



**HAL**  
open science

# La dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu. Approche systémique et multi-échelles

Gabriela Adina Morosanu

## ► To cite this version:

Gabriela Adina Morosanu. La dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu. Approche systémique et multi-échelles. Hydrologie. Université Grenoble Alpes; Universitatea București. Facultatea de Geografie, 2019. Français. NNT : 2019GREAU036 . tel-03092262

**HAL Id: tel-03092262**

**<https://theses.hal.science/tel-03092262v1>**

Submitted on 2 Jan 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

préparée dans le cadre d'une cotutelle *entre la  
Communauté Université Grenoble Alpes et l'Université  
de Bucarest*

Spécialité : **Océan, Atmosphère, Hydrologie (CEOAH)**

Arrêté ministériel : le 6 janvier 2005 – 25 mai 2016

Présentée par

**Gabriela Adina MOROȘANU**

Thèse dirigée par **Philippe Belleudy** et **Liliana ZAHARIA**

préparée au sein de l'**Institut de Géosciences de l'Environnement (IGE)** et de la **Faculté de Géographie**, dans les Écoles Doctorales « **Terre, Univers, Environnement** » et « **Simion Mehedinți - Nature et Développement Durable** »

# La dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant de la rivière Jiu. Approche systémique et multi- échelle

Thèse soutenue publiquement le « **19 décembre 2019** »,  
devant le jury composé de :

**Mme Laura COMĂNESCU**

Professeur des Universités (Faculté de Géographie - Bucarest), Président

**M. Dan BĂLTEANU**

Professeur des Universités (Institut de Géographie de l'Académie Roumaine),  
Rapporteur

**M. Pierre – Gil SALVADOR**

Professeur des Universités (Université de Lille), Rapporteur

**Mme Iuliana ARMAȘ**

Professeur des Universités (Université de Bucarest), Examineur

**M. Philippe BELLEUDY**

Professeur Emérite (Université Grenoble Alpes), Directeur de thèse

**Mme Liliana Zaharia**

Professeur des Universités (Université de Bucarest), Directrice de thèse







Dédicace à ma mère

**If the earth is a mother, then rivers  
are her veins (Amit Kalantri)**



*La Jiu dans le secteur des gorges (Moroşanu, octobre 2017)*



# Table de matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	vi
Abstract.....	viii
Rezumat.....	x
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xxiii
Liste des acronymes et abréviations.....	xxv
Liste des notations.....	xxvii
Grille de lecture.....	xxix

## Première partie

### L'échelle du bassin de la rivière Jiu: les facteurs contrôlant la dynamique hydro-sédimentaire

<b>Chapitre 1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexte de la recherche.....	2
1.2. Motivation du choix du bassin de la rivière Jiu.....	5
1.3. Questions de la recherche et objectifs.....	6
1.4. Organisation de la thèse.....	7
<b>Chapitre 2. Aspects conceptuels et méthodologiques : système fluvial, échelles spatiales et temporelles, connectivité.....</b>	<b>10</b>
2.1. Approche systémique.....	11
2.1.1. Le système fluvial : quelles perspectives ?.....	11
2.1.2. Le concept d' "Hydrosystème" .....	17
2.1.3. Le système total vs. le système partiel.....	20
2.2. Approche multi-échelle.....	21
2.2.1. L'échelle spatiale.....	23

2.2.2. L'échelle temporelle.....	27
<b>2.3. La connectivité dans un système fluvial : une notion qui lie tout ?.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4. Méthodologie et données.....</b>	<b>31</b>
2.4.1. Méthodes et outils utilisés dans l'étude des systèmes fluviaux et de la dynamique hydro-sédimentaire.....	31
2.4.2. Données.....	34
<b>Chapitre 3. Caractérisation de la zone d'étude : le bassin versant de la rivière Jiu.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1. L'état de connaissance de la zone d'étude.....</b>	<b>38</b>
3.1.1. Etat de l'art sur le relief et la géologie.....	38
3.1.2. Etat d'art sur les aspects climatiques.....	40
3.1.3. Etat d'art sur les problèmes d'hydrologie et d'hydrographie.....	41
<b>3.2. Repères de localisation.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3. Le substrat géologique.....</b>	<b>49</b>
<b>3.4. Les unités morphologiques.....</b>	<b>53</b>
3.4.1. Les unités morphologiques.....	53
3.4.2. Le secteur montagneux.....	58
3.4.3. Le secteur subcarpatique.....	61
3.4.4. Le plateau de Mehedinți .....	62
3.4.5. Le Piémont Gétique.....	63
3.4.6. Le secteur de plaine.....	64
<b>3.5. Particularités climatiques.....</b>	<b>64</b>
3.5.1. Données et méthodes.....	65
3.5.2. Variabilité de la température de l'air.....	66
3.5.3. Variabilité des précipitations.....	71
3.5.4. Diagramme climatique de Péguy.....	79
<b>3.6. Un bassin avec des caractéristiques hydrographiques complexes.....</b>	<b>81</b>
3.6.1. Les sous-bassins et leur réseau hydrographique.....	81
3.6.2. Le réseau de drainage : la densité et la hiérarchisation.....	89

<b>3.7. Les sols et leur importance hydrologique</b> .....	95
3.7.1. La classification génétique des sols.....	95
3.7.2. Les groupes hydrologiques des sols.....	98
<b>3.8. La couverture et l'utilisation du sol</b> .....	100
<b>3.9. Pressions anthropiques sur les flux hydro-sédimentaires</b> .....	107
3.9.1. L'exploitation du charbon.....	108
3.9.2. Les aménagements hydrotechniques.....	113
3.9.3. Les changements dans la couverture forestière.....	115
3.9.4. L'extraction des granulats des lits des rivières.....	119
<b>Synthèse du chapitre</b> .....	121

## **Chapitre 4. Analyses des flux sédimentaires à l'échelle systémique du bassin de la rivière Jiu : des versants vers l'aval**.....122

<b>4.1. Méthodologie pour quantifier le rôle des facteurs contrôlant la variation de la teneur totale en matières dissoutes des rivières</b> .....	123
4.1.1. Données et méthodologie.....	124
4.1.2. Résultats des approches statistiques .....	131
4.1.3. Discussions et conclusions .....	134
Synthèse partielle 1.....	135
<b>4.2. Processus gouvernant la genèse et le transfert des sédiments à l'échelle du bassin de la rivière Jiu</b> .....	135
4.2.1. Méthodologie.....	136
4.2.2. Résultats et discussions.....	145
Synthèse partielle 2.....	158
<b>4.3. Connectivité potentielle sédimentaire</b> .....	158
4.3.1. Considérations théoriques sur la connectivité sédimentaire .....	159
4.3.2. L'indice de connectivité : cadre conceptuel .....	164
4.3.3. Méthodologie de calcul de l'indice de connectivité adaptée à la problématique du bassin de la rivière Jiu.....	168
4.3.4. Résultats de l'analyse de connectivité.....	179
<b>Synthèse partielle 3</b> .....	192

<b>Chapitre 5. Fonctionnement hydrologique du bassin de la rivière Jiu</b> .....	194
<b>5.1. Comment les débits sont-ils obtenus ?</b> .....	194
5.1.1. Jeu de données hydrologiques utilisées.....	194
5.1.2. Equipement et protocole de mesure.....	198
5.1.3. Contrôle des données.....	202
<b>5.2. Variabilité spatio-temporelle des débits liquides</b> .....	221
5.2.1. Echelle multi-annuelle et annuelle.....	221
5.2.2. Echelle mensuelle et saisonnière.....	242
5.2.3. Les crues.....	250
<b>5.3. Variabilité spatio-temporelle des débits solides</b> .....	261
5.3.1. La dynamique spatio-temporelle des débits des alluvions en suspension à l'échelle multi-annuelle.....	261
5.3.2. La dynamique spatio-temporelle des débits des alluvions en suspension à l'échelle mensuelle et saisonnière.....	266
5.3.3. L'importance de l'industrie du charbon dans la production des alluvions.....	267
5.3.4. Les débits des alluvions en suspension pendant les crues.....	269
5.3.5. L'hystérésis à l'échelle journalière entre le débit liquide et le débit d'alluvions en suspension.....	274
5.3.6. Les relations entre les débits solides et les paramètres morfo-lithologiques.....	284
<b>Synthèse du chapitre</b> .....	290

## Deuxième partie

### Echelles spatio-temporelles dominant le transfert hydro-sédimentaire

<b>Chapitre 6. Quels sont les apports de sédiments en crue ? Aspects théoriques et pistes de recherche</b> .....	293
<b>6.1. Bilan ou budget sédimentaire ?</b> .....	293
<b>6.2. Le transport des sédiments par charriage et en suspension. Quel choix ?</b> .....	296

6.2.1. Aspects théoriques généraux sur les transports par charriage et en suspension.....	296
6.2.2. Quelle approche pour l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire ? .....	302
<b>6.3. Démarche : analyse d'une archive sédimentaire récente.....</b>	<b>303</b>
6.3.1. L'archive sédimentaire – c'est quoi ? .....	303
6.3.2. Une archive sédimentaire sur la rivière Jiu .....	307
6.3.3. Mécanismes de dépôt sédimentaire dans le lit majeur .....	309
6.3.4. Hypothèses de l'analyse du dépôt sédimentaire.....	311
6.3.5. Pourquoi on ne peut pas utiliser les sédiments du lit mineur pour ce travail? .....	315
<b>Synthèse du chapitre.....</b>	<b>315</b>
<b>Chapitre 7. Contributions des sous-bassins versant aux flux hydro-sédimentaires</b> .....	<b>318</b>
<b>7.1. Raisonner à l'échelle des crues.....</b>	<b>320</b>
7.1.1. Rappel des considérants sur la relation crues – dépôts de berges.....	320
7.1.2. Analyse statistique des crues.....	322
7.1.3. Détermination d'un débit seuil de débordement.....	324
7.1.4. Sélection des crues débordantes.....	340
<b>7.2. Jeux de données. Critique.....</b>	<b>346</b>
7.2.1. La cohérence des débits amont – aval.....	346
7.2.2. Validité des données de transport solide.....	349
<b>7.3. Les crues débordantes : de quels sous-bassins ?.....</b>	<b>352</b>
7.3.1. Sélection des stations hydrométriques.....	352
7.3.2. Bases de données. Limites d'exploitation.....	355
<b>7.4. D'où viennent les crues ? Analyse des indices de crues.....</b>	<b>360</b>
7.4.1. Principe d'analyse.....	360
7.4.2. Choix des indices de crue.....	362
7.4.3. Présentation des indices de crue pour l'année 2014.....	365
7.4.4. Discussion sur les indices de crue.....	383
<b>Chapitre 8. Analyse des dépôts sédimentaires. Échantillonnage et méthodes utilisées.....</b>	<b>393</b>



<b>8.1. Quels sont les types de sédiments et d'où prenons-nous les échantillons ?</b> .....	394
8.1.1. L'échantillonnage sédimentaire des lits "en amont" .....	395
8.1.2. L'échantillonnage sédimentaire des berges "en aval" .....	400
8.1.3. Les échantillons de charbon brut des zones source .....	410
<b>8.2. Méthodes de laboratoire pour l'analyse des échantillons.</b> .....	411
8.2.1. La granulométrie.....	412
8.2.2. La colorimétrie.....	419
8.2.3. Analyse d'image.....	422
8.2.4. La pétrologie organique.....	427
8.2.5. Méthodes géochimiques.....	431
<b>Chapitre 9. Résultats des analyses sur les sédiments de la tranchée</b> .....	443
<b>9.1. La succession des couches</b> .....	444
9.1.1. Confirmation de la stratigraphie.....	444
9.1.2. Caractéristiques des couches.....	448
9.1.3. Synthèse des résultats. Mise en évidence des couches les plus cohérentes.....	458
9.1.4. Synthèse sur les méthodes utilisées pour l'analyse des sédiments déposés à Podari.....	459
<b>9.2. Datation de la couche basale</b> .....	460
9.2.1. Principes de la datation.....	460
9.2.2. Le site et le protocole d'échantillonnage.....	464
9.2.3. Le protocole de laboratoire.....	468
9.2.4. Résultats de la datation.....	475
9.2.5. Interprétation des résultats, conclusions et perspectives.....	477
<b>Chapitre 10. Résultats finaux : quelles crues desquels bassins versant?</b> .....	479
<b>10.1. Hypothèses sur l'estimation des côtes atteintes par les crues</b> .....	481
10.1.1. La relation entre l'altitude des couches et la côte à l'échelle de la station hydrométrique de Podari.....	481
10.1.2. Sélection des crues susceptibles de déposer des couches sédimentaires.....	485
<b>10.2. Les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval correspond-elle aux caractéristiques signalées en amont?</b> .....	489

10.2.1. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l’aval et échantillonnés en amont en utilisant la colorimétrie.....	490
10.2.2. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l’aval et échantillonnés en amont par l’analyse d’image.....	503
10.2.3. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l’aval et échantillonnés en amont par la pétrologie organique.....	505
10.2.4. Résultats des analyses géochimiques.....	511
<b>10.3. La synthèse des possibles caractéristiques des zones sources de sédiments déposées à la tranchée alluviale de Podari.....</b>	<b>522</b>
<b>10.4. Retour sur les hypothèses initiales.....</b>	<b>527</b>
<b>Synthèse du chapitre.....</b>	<b>528</b>
<b>Chapitre 11. Conclusions finales.....</b>	<b>528</b>
<b>11.1. Synthèse des résultats et réponse aux questions de la recherche.....</b>	<b>529</b>
<b>11.2. Conclusions générales sur la démarche méthodologique.....</b>	<b>521</b>
<b>11.3. Limites de l’approche et perspectives.....</b>	<b>535</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>548</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>600</b>

## Remerciements

A l'issu de ce sinueux travail de thèse, je tiens à remercier à toutes les personnes qui m'ont donné un coup de pouce ou qui, par un heureux hasard, m'ont positivement influencé et inspiré. Que par ces pages soient exprimés tous mes sentiments de gratitude envers tous ce qui ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire !

En premier lieu, je rends grâce à mes deux directeurs de thèse, *Liliana Zaharia* (*professeur à l'Université de Bucarest*) et *Philippe Belleudy* (*prof. émérite à l'Université Grenoble Alpes*), pour la confiance qu'ils ont investie en moi et pour tout le support scientifique et moral qu'ils m'ont donné. Vous avez été pour moi des vrais parents académiques.

*Mme Liliana Zaharia*, c'est avec vous que j'ai grandi comme scientifique et que j'ai découvert la passion pour les rivières. Je ne trouve pas de mots adéquats pour décrire la reconnaissance que je vous porte pour m'avoir acceptée et guidée tout au long de mon parcours universitaire, dans l'élaboration de mon mémoire de licence, dans l'aventure roumano – belge pour l'obtention de mon diplôme de master et, bien sûr, pendant ces dernières années, pour avoir accompagné mes anxieux pas sur les braises de la route vers les hauteurs de la Jiu. Toutes les situations de travail ensemble, pour la thèse, pour les projets communs, à des fins de recherche, didactiques ou administratives ont confirmé votre qualité professionnelle et humaine et notre compatibilité. Je vous remercie pour les conseils toujours pertinents, pour votre encouragement, pour l'esprit éthique, pour votre télépathie autant sur le plan professionnel que personnel. Craignant de ne pas vous décevoir, mes pensées se sont tournées vers vous dans les moments difficiles à Grenoble.

*M. Philippe Belleudy*, je commence par vous remercier pour votre acceptation de co-diriger la thèse dont le projet vous a été présenté en toute urgence à l'aube de 2015. Je continue à exprimer ma gratitude pour avoir sacrifié une partie précieuse de votre temps au cours des dernières années de votre carrière, pour mener au but une thèse assez compliquée, surtout du point de vue de la "compatibilité" de pensée et entre les systèmes d'éducation roumain et français. Nous avons eu une belle collaboration quand même, avec de nombreux entretiens féconds, souvent parsemés avec divergences, mais qui finalement m'ont enrichie et m'ont conduit vers la réponse ou, au moins, vers une hypothèse. Je vous remercie également pour les explications techniques, pour le soin que vous avez pris de moi pendant mes séjours à Grenoble, pour les voyages dans les Alpes, pour les délicieux piqueniques dans votre jardin ou sur le terrain, pour les livres de littérature empruntés... Si je devais résumer en quelques mots quelle est la compétence la plus précieuse que j'ai acquise en travaillant avec vous, c'est toujours l'aptitude de se poser des questions, même si la plupart n'auront pas de réponse. Merci pour tout ... je suis plus critique et autocritique grâce à vous.

Je suis fortement reconnaissante de l'appui de la part des *Ecoles Doctorales* au sein desquelles ma thèse s'est déroulée : prof. *Iuliana Armaş* (précédée par prof. *Cristian Braghină* du côté roumain), de la part de l'Ecole Doctorale « *Simion Mehedinţi – Nature et Développement Durable* » et prof. *Guy Delrieu* et *Emmanuel Cosme* du côté français, de la part de l'Ecole Doctorale « *Terre, Univers, Environnement* ». J'exprime aussi mon gré aux secrétaires de ces deux écoles doctorales, qui m'ont accompagné au long des lourdes démarches administratives. Mme *Alexandrina Razaei*, Mme *Florence Thomas*, Mme *Christine Bigot*, j'espère que les problèmes bureaucratiques des deux pays autour de ma thèse ne vous ont demandé trop d'effort de gestion.

**J'adresse aussi mes remerciements aux membres du jury, pour avoir accepté de rapporter mon mémoire.**

J'ai été honorée de pouvoir interagir avec les membres et participants à mes commissions de thèse chaque début d'année académique. Je remercie pour avoir écouté mes présentations et pour

tous les conseils offerts à ces occasions à Prof. [Nicoleta Ionac](#), Prof. [Gabriela Ioana – Toroimac](#) (votre encadrement théorique et méthodologique a toujours représenté pour moi une ligne directrice et vous avez été ma première source d'inspiration didactique), Dr. [Benoit Camenen](#), Prof. [Cédric Legout](#), Prof. [Ivan Canjevac](#). Je remercie également aux autres participants à mes commissions de thèse, qui m'ont encouragée, spécialement aux prof. [Dana Constantin](#) et prof. [Valentina Mănoiu](#).

Mes vifs remerciements sont aussi adressés aux chargés scientifiques et au personnel administratif des deux établissements, pour leur dévouement à la cause de ma thèse de doctorat : [Mmes. Sandrine Anquétin](#), [Odette Nave](#), [Carmeline Méli](#), [Manon Garreau](#), [Adriana Stoenescu](#), [Valérie Lanari](#), [Mihaela Dobre](#). [M. Pierre Brasseur](#), [Mme Oana Puia](#).

La thèse a été soutenue financièrement par la Bourse Ministérielle Roumaine et par la Bourse du Gouvernement Français et à cette occasion, j'aimerais remercier tous les gestionnaires de la part de [l'Université de Bucarest](#), de [l'Institut Français à Bucarest](#), du [Campus France – Grenoble](#) et de [l'Université Grenoble Alpes](#), pour avoir assuré la bonne organisation des formalités que j'ai dû accomplir. Afin de mener des activités de recherche spécifiques sur le terrain ou dans les laboratoires, des partenariats et des projets ont été développés. Le projet AMIPAHYR (financé par les organismes AUF et IFA) a contribué avec des compléments de voyage entre la Roumanie et la France. Des soutiens financiers supplémentaires ont été obtenus aussi des organismes [Labex](#), [Connecteur](#), [CEEPUS](#). Je remercie également le [Rectorat de l'Université de Bucarest](#) pour son soutien financier à certaines conférences. Les mêmes remerciements s'adressent à [l'Institut des Géosciences de l'Environnement](#), pour ses compléments financiers au cours de mes voyages Roumanie - France.

Certains des chapitres n'auraient pas pu exister sans l'apport méthodologique des collaborateurs que j'ai trouvés le long de ma recherche constante pour des moyens nécessaires (afin de réaliser une thèse « low-cost »). Je commence par remercier la professeure [Magdalena Misz-Kennan](#), de la [Faculté des Sciences](#) de la [Terre](#) de [l'Université de Silésie de Katowice](#), pour le soutien qu'elle a apporté à la réalisation des mesurages et d'analyses en pétrologie organique. *Professor Magdalena Misz-Kennan, thank you very much for your passionate trainings in the microscopic world of the coal, as well as to Prof. Padhraig Kennan for his interesting geologic stories about Ireland!* I also thank [Prof. Jolanta Burda](#), for her kind administrative support. Je continue en remerciant [Marco Cavalli](#) et [Stefano Crema](#), de [l'Istituto de Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Padova](#), pour la belle collaboration autour de la connectivité hydro-sédimentaire. *Thank you, Stefano and Marco, for the warm welcome in your research team and for your help.* En Roumanie, j'ai rencontré des chercheurs qui m'ont offert leur soutien et qui m'ont hébergée dans leurs laboratoires. Je remercie à cette occasion à M. le professeur [Eugen Traistă](#) ([Faculté des mines, Université de Petroșani](#)) pour notre collaboration sur l'analyse géochimique des sédiments. J'ai beaucoup apprécié votre façon calme et orientée vers le côté pratique des choses. Mes remerciements profonds sont tournés aussi vers la professeure [Alida Timar Gabor](#) ([Université Babeș Bolyai – UB, Faculté des Sciences de l'Environnement et de l'Ingénierie](#)), pour son accueil chaleureux au sein du collectif de datation de [l'Institut des Bio-Nano-Sciences de Cluj-Napoca](#). Merci à toute votre belle équipe bien soudée et professionnelle : tout d'abord merci beaucoup, [Daniela Constantin](#), pour ta patience et pour ton esprit perfectionniste pour compléter l'analyse de la datation des sédiments; merci aux maitre de conférences [Dr Robert Begy](#) et aux doctorant [Szabolcs Kelemen](#), pour avoir effectué les mesures et le traitement des données de spectrométrie. Finalement merci beaucoup aux doctorantes du bureau de Cluj, [Anca](#), [Viorica](#) et [Mădălina](#) (je vous souhaite bon courage dans vos recherches).

Pendant ma première année de thèse, quand je n'avais pas de bureau, c'était à la [Bibliothèque de la Faculté de Géographie de Bucarest](#) que j'ai commencé la recherche. Je remercie aux bibliothécaires pour leur aide à trouver les bons livres.

Un grand merci se dirige aussi vers les membres de l'équipe *HyDRIMZ* de l'*Institut de Géosciences de l'Environnement (UGA)* et aux professeurs du département de *Météorologie – Hydrologie (UB)*, pour leur partage d'expériences (même indirectement) et pour jeter un coup d'œil de temps en temps sur l'avancement et les conditions de déroulement de ma thèse : professeurs *Jean Martins, Céline Duwig, Julien Néméry, Lorenzo Spadini, Iulian Săndulache, Adrian Tiscovschi, Ștefan Iordache*. Des remerciements particuliers vont aussi aux professeurs *Sylvain Bigot* et *Sandre Rome*, pour m'avoir mise en contact avec mon directeur *Philippe Belleudy*, pour nos conversations autour de ma thèse et pas le moindre, pour leur collégialité de géographes que j'ai toujours cherchée dans le « labo orienté ingénieur ». Des commentaires, suggestions de bibliographie et approches méthodologiques ou remarques vis-à-vis de certaines démarches de ma thèse ont été apportés par nombre de professeurs de différentes universités : *Théophile Vichel, Brice Boudevillan, Anne – Catherine Favre, Maria Radoane, Dan Dumitriu, Ionut Sandric, Charlotte Lloyd, Florina Grecu, Donald Cayer*. Je remercie vivement à *Ludovic Oudin* et *Pierre Ribstein (Université Paris 6 Pierre et Marie Curie)* pour m'avoir initié dans la modélisation hydrologique pendant mon premier stage en France, en 2015; et pour l'aide de dernier moment dans la thèse. Je remercie vivement aux professeurs de la direction de la Faculté de Géographie pour m'avoir aidé toujours avec célérité dans les formalités : *Laura Comănescu, Mioara Clius, Georgeta Bandoc, Octavian Cocoș, Cristian Tălângă*.

Il y a deux ans et demi que je me trouve dans le collectif de l'*Institut de Géographie de l'Académie Roumaine*, où j'ai rencontré des gens chaleureux, passionnés pour la science et intéressés de ma thèse. Merci à tous pour votre amitié et votre collégialité que vous m'avez montrées, pour la belle atmosphère de recherche et pour les activités que nous avons pu réaliser jusqu'à présent en dehors de ma thèse. Je mentionne juste quelques noms pour leur remercier, bien que j'avais quelque chose à apprendre de tous : *Prof. Acad. Dan Balteanu, Dr. Monica Dumitrașcu, Dr. Sorin Geacu*, collègues et collaborateurs du bureau « doctorants » - *Mihaela Sima* (une ambiance toujours créative et relaxante avec vous...et merci pour la relecture très pertinente du dernier moment), *Constanța Boroneanț* (le trio excellent entre la rigueur climato, la jeunesse perpétuelle et le talent cuisinier), *Laura Lupu* (la copine de thèse qui survit avec un œuf et un bretzel dans une journée de travail intense. Merci pour la biblio !) et *Diana Dogaru* (tes remarques relaxées et ton esprit western me détractent autant), ainsi que d'autres collègues des départements et bureaux voisins : *Marta Jurchescu* (merci pour ton coaching professionnel, ton empathie francophone, pour nos débats sur la philosophie de la recherche, et sur l'éclairage extérieur de la thèse), *Cristina Dumitrică* (on devra reprendre les travaux sur la couture, le bricolage et le développement du labo), *Lilioara Dincă* (ton esprit ouvert et jovial donne un sourire à ma journée), *Irena Mocanu, Ines Grigorescu, Gheorghe Kucsicsa, Mihai* et *Dana Micu, Bianca Mitrică, Mme Mayerson, Cătălina Mărculeț, M. Max*...pas de place pour tous! Merci pour vos conseils et encouragements! Je suis passée de bons moments avec vous!

Une série de données hydrologiques et cartographiques ont été obtenues grâce à la bienveillance de certaines institutions roumaines, que j'ai l'honneur de mentionner ici: *ANAR, INHGA, ABA Jiu, IGAR, ANM* (en particulier à *Marius Bîrsan*). J'ai également bénéficié des conseils et du soutien de *Viorel Chendeș, de Ruth Perju, de Geanina Neculau, de George Zanfir, de Mihai Barbuc, de Ileana Tănase* et, pas dernièrement, de la part de *Gabriel Minea*. Merci beaucoup, *Gabriel*, pour les conversations très pointues sur les questions d'hydrologie et pour ton ouverture scientifique.

L'un de mes buts durant mes « pèlerinages » à Grenoble a été sans aucun doute de suivre des cours de doctorat. Je suis reconnaissante à l'*Université de Grenoble Alpes* pour cette opportunité qui m'a accompli en tant que scientifique.

Travailler sur le terrain et dans le laboratoire n'a pas été facile... c'était parfois épuisant et consommateur de temps, d'énergie et de ressources financières. Souvent, les tâches de travail "accalmies" par les conseils et les points de vue critiques de certains enseignants, doctorants et techniciens qui m'ont accompagné à l'occasion des manipulations de laboratoire ou des travaux sur

le chantier. Merci beaucoup, *Ivan Canjevac, Nenad Buzjak, Erwan Vince, Nathaniel Flindling, Cindy Arnoldi, Cédric Legout, Mladen Plantak*. Merci aussi à *Marin Cristi*, pour nous avoir conduit en toute sécurité sur les routes pavées et moins pavées du bassin de la rivière Jiu. Toujours sur le terrain, pendant mes propres expéditions scientifiques, je n'aurais pas réussi sans l'aide des personnes chères qui m'ont accompagnées dans les « petites excursions » dans la contrée de la Jiu : *Diana, Roxana, Adina, Alex*. Je remercie également à ceux qui m'ont procuré les morceaux de charbon : cousine *Simona*, oncle *Nicu*, collègue et ami *Teodor Petruț*.

Mes plus sincères remerciements vont à mes collègues de doctorat de Bucarest, avec qui j'ai vécu des moments de joie, d'émotions, de stress, de panique, mais surtout de bonheur : *Florentina, George, Lex, Nicu, Alina, Florin, Irina, Ligia, Bogdan*. Coté Grenoble, j'ai partagé avec vous, chers collègues, des années pleines de joie et de fraternité. Tout d'abord, merci, *Pati*, pour m'avoir « contaminé » avec ton tonus et pour avoir convié avec moi et toujours soulevé mon humeur, et merci, *Magda*, pour ton calme et ton sourire (que je confonds parfois avec celui de Flora). Merci à *Linus* aussi, pour son hospitalité. Vous allez me manquer énormément, mais le monde est petit. Merci, *Mabe*, pour ta gentillesse et ton désir d'apprendre toujours des nouvelles choses. Merci, *Claudio* et *Nino*, pour l'allégresse que vous m'avez toujours amenée. Merci, *Lau* et *Océ*, pour votre joie de vivre et l'intérêt pour mon pays et mes activités. Merci, *Catherine*, pour ton esprit ouvert et compréhensif et pour les belles histoires américaines. Encore merci, *Jinhwa*, pour les séances de « sophrologie » qu'on a eues ensemble. Merci à toi aussi, *Gaby*, pour tes histoires sur les plateaux boliviens. Merci à tous qui ont mis vos maisons à ma disposition lorsque je n'avais pas de place pour dormir à Grenoble. Je vous attends en Roumanie ! La vie à *IGE* a été plus colorée grâce aux échanges avec les vétérans français : *Camille* (grand merci pour tes conseils et ton mentorat), *Marine, Louise, Aude, Coraline*. Et, bien sûr, je remercie tous les contemporains internationaux de thèse avec qui j'ai passé des beaux repas de midi et des fêtes à différentes occasions plus au moins traditionnelles : *Hans, Alessandra, Giancarlo, Anil, Foutini, Fernando, Astrid, Jai, Nico*. Quelques stagiaires, co-bureau ou campagnards de formations, ont aussi contribué à l'ambiance jeune de l'IGE. Merci, *Jonathan, Stefano, Issam, Svénya, Salma, Ana, Mathilde*. Les amis doctorants de l'autre côté de la Rue de la Physique auront aussi une place spéciale dans mes souvenirs. Merci *Nadia* et *Diego*, merci *Raul*, merci *Jorge*, merci *Jasmine*. Un jour je vais vous rendre visite dans vos pays. Les amis roumains du labo *GIPSA*, je ne vous ai pas oubliés. Merci, *Teo, Andrei, Irina* (avec ton cher *Mihai*), *Corina* (bonne chance aux enfants !), *Ion*, pour m'avoir intégrée dans votre group, pour les discussions scientifiques et extrascientifiques pendant nos déjeuners. Je n'oublie pas les collègues de cours de français avec qui j'ai parlé portugais (merci, chère *Bruna*, pour ton esprit jovial), merci *Thiago*. Merci à tous les jeunes rencontrés pendant mon expérience doctorale. Vous m'avez donné une raison de plus chaque jour pour avoir envie de venir au labo et c'était chouette de vous connaître !

En dehors des parois des deux universités, j'ai rencontré des gens qui m'ont beaucoup aidé à maîtriser certains aspects de la recherche, que ça soit en numérique, théorique, insertion professionnelle ou passion pour le sujet de discussion. Je voudrais remercier premièrement à toi, *Jérémy*, pour ta disponibilité de travailler avec moi sur l'hydrologie et pour ton partage d'expérience avec les outils ! Merci, *Claudiu*, pour avoir eu le courage de m'aborder par Internet et me parler sur ta passion de toute une vie, la rivière Jiu, et son destin à l'époque de l'hydroénergie. Je remercie à la douce *Amel*, pour ne m'avoir pas oubliée depuis la conférence de 2014 dans le Delta du Danube (c'était un plaisir de te montrer Grenoble et d'apprendre de toi l'histoire hydrologique de Lyon), à *Călin*, pour son esprit civique et sa lutte pour sauver les rivières. Merci à toi aussi, *Michel Cuevas*, pour avoir partagé tes compétences en modélisation.

J'ai eu beaucoup à apprendre aussi de l'expérience d'enseignement, et pour ça je remercie respectueusement à mes directeurs de thèse (Liliana Zaharia et Philippe Belleudy) et aux



professeurs *Gabriela Toroïmac, Thierry Pellarin, Bruno Wilhelm, Ghislain Picard*. Merci aussi aux étudiants qui m'ont inspiré (*Eva et Kim*) et qui ont accepté le challenge des crues et m'ont aidé avec la transcription de quelques données hydrologiques (*Alexandra, Cristina et Steluta* – merci, les filles).

Hors du monde de la recherche, plusieurs personnes m'ont soutenue, m'ont écoutée parler trop de mes soucis de thèse trop accaparatrice. Je remercie dans ce contexte à mes amis et proches qui m'ont toujours encouragée et ont compris mes peines et zigzags de doctorant. Merci encore une fois, *Roxi*, merci *Ralu, Gabitzu, Lavi, Cosmina, Ema* (& *Daniela*). Grands remerciements pour *Lăcrămioara* aussi. Tu as été à mon écoute toujours ! Mes colloques de chambre à Bucarest: merci *Irina, Codruța et Denisa* et bon courage à la suite. A Grenoble, à part les maris *Belleudy* (merci, *Mme Marie – Claude*, pour votre gentillesse et votre hospitalité), deux autres familles ont participé à mon intégration et au bon déroulement de ma thèse dans la dernière année. Merci, *Annick* et *Olivier Michel*, pour votre mentorat professionnel et pour la relecture de nombre des chapitres. Merci, *Marie* et *José Martin*, pour me faire me sentir comme chez moi. Le jardin, la paella, le vide grenier, les chaises décorées, et même la morue salée du dernier soir vont me manquer.

Je suis endettée à *mon père*, pour son soutien moral et la confiance dans mon choix de carrière, même si au début il n'a pas pu s'imaginer sa fille unique « marcher dans des bottes en caoutchouc ». Je te remercie, papa, pour m'avoir laissée suivre ma voix intérieure, afin d'être, au final, contente avec mes décisions. Merci également pour ton implication dans certaines de mes missions sur le terrain. Le travail à la pelle a été difficile, mais cela en valait la peine. Je te remercie, où tu es maintenant, *chère maman*, pour l'éducation que tu m'as donnée, pour l'amour de livre que tu m'as inculquée, pour la compatibilité totale entre nous (tu savais dès le début ce que j'avais besoin pour maîtriser les sciences de la terre), pour ton talent d'enseignant qui m'a beaucoup inspiré, pour ton esprit toujours vif qui est en moi. Merci de mon cœur aux mes *grands-parents* aussi, qui m'ont soutenu avec fierté dans mon parcours doctoral. Merci *à toute ma famille* qui a échangé des bons moments avec moi pendant mes courtes et toujours stressées visites chez eux.

J'ai laissé au final la plus importante personne de ma vie à qui je dois les plus doux, drôles, et inoubliables moments. Je te remercie, *Mihail*, pour ta patience de m'avoir écoutée parler de ma thèse tellement de fois, pour tes bons conseils, pour la confiance en moi et pour toute ton aide intellectuel et moral. Merci à *ta grand-mère* pour ne pas trop insister avec les conversations quand mes pensées étaient envahies par le stress quotidien de la recherche doctorale. Je te remercie infiniment pour avoir compris que pendant beaucoup de jours je ne pouvais pas sortir et qu'il fallait mieux me laisser dans mon monde. Enfin, la thèse n'aurait pas pu avoir un aspect un peu plus propre sans ta relecture critique.

## Résumé

La thèse doctorale intitulée « **La dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant de la rivière Jiu. Approche systémique et multi-échelle** » s'est proposée d'investiguer la manière dans laquelle la dynamique des flux liquides et solides se produit au niveau du bassin versant de la rivière Jiu, à des divers échelles spatiales et temporelles. Le bassin étudié s'étale sur une surface de 10.080 km<sup>2</sup>, dans la partie sud-ouest de la Roumanie (la région de l'Olténie). La rivière Jiu (ayant une longueur de 339 km) est un des plus importants affluents du Danube dans cette partie de la Roumanie.

Dans le contexte actuel de la nécessité d'élaborer des plans de gestion du bassin de plus en plus complexes, avec un caractère intégré, englobant l'ensemble des facteurs naturels et anthropiques qui contrôlent l'écoulement solide et liquide, ainsi que les processus associés, le présent travail offre des informations précieuses et originelles sur la dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant de la rivière Jiu, issues d'une recherche transdisciplinaire réalisée à différentes échelles spatiales et temporelles.

Le bassin étudié se caractérise par des particularités géographiques complexes, déterminées par la diversité des facteurs naturels (géologiques, morphologiques, climatiques, édaphiques et de végétation) et socio-économiques. Du point de vue économique, l'élément qui donne l'individualité du bassin de la rivière Jiu est la présence et l'exploitation du charbon dans les secteurs supérieur (houille) et moyen (lignite). L'existence du charbon a été valorisée dans notre travail afin d'étudier la dynamique hydro-sédimentaire, en se fondant sur l'analyse, par des diverses méthodes de laboratoire, du teneur en charbon et éléments associés des sédiments collectés du lit de la Jiu et de ses principaux affluents. Nous sommes d'avis que l'utilisation du charbon en tant que traceur hydro-sédimentaire représente un élément d'originalité de la présente étude.

Ce travail se propose de répondre à deux questions majeures :

*(i) Quels sont les facteurs naturels et anthropiques contribuant à la production et au transfert des flux de matière liquide et solide au niveau du bassin de la rivière Jiu et quel est leur rôle dans la dynamique hydro-sédimentaire ?*

*(ii) Quelle est l'importance des échelles spatiales et temporelles dans l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire en ce qui concerne les sources de sédiments, les événements hydrologiques extrêmes, les voies de transfert et les zones favorables à l'accumulation ?*

La démarche méthodologique a suivi une optique allant du général vers le particulier.

Dans la première partie de la thèse, les analyses sont réalisées à l'échelle du bassin entier, afin de mettre en évidence les facteurs physiques et anthropiques contrôlant les flux liquides et solides. Les aspects traités portent sur la connectivité entre les sources, le transfert et les zones d'accumulation, ainsi que la relation entre le débit liquide et le débit solide et la cartographie des processus géomorphologiques génératrices de sédiments.

Dans la deuxième partie de la thèse, on passe de la perspective systémique sur l'ensemble du bassin de la Jiu à une échelle beaucoup plus réduite, tant du point de vue spatial que temporel, afin



d'identifier le rôle des événements hydrologiques extrêmes (les crues majeures enregistrées dans le bassin de la Jiu) dans la dynamique hydro-sédimentaire et la contribution des sous-bassins au transfert des sédiments fins. Du point de vue méthodologique, dans cette partie de la thèse, on passe des méthodes classiques de la géographie et de l'hydrologie, utilisées dans la première partie (basées sur la représentation cartographique et l'analyse spatiale dans le milieu SIG et sur l'analyse statistique des séries de données), vers une méthodologie complexe, intégrant l'analyse hydrologique (sur la base des indices de crue), la recherche sur le terrain (l'identification d'un site de dépôt d'alluvions et la collecte d'échantillons) et l'analyse des sédiments fins dans le laboratoire (par des techniques colorimétriques, géochimiques et de la pétrologie organique).

Les résultats de la recherche ont mis en corrélation les facteurs de la dynamique hydro-sédimentaire à des diverses échelles spatiales et temporelles, dans une vision systémique. Les analyses de laboratoire (à l'échelle micronique de l'échantillon), celles des crues (à l'échelle diurne, saisonnière et annuelle, ainsi que la contribution des sous-bassins versants) et les analyses des particularités hydrologiques, géographiques et géomorphologiques du bassin de la rivière Jiu ont contribué, tous, à une meilleure connaissance de la dynamique hydro-sédimentaire, en offrant des informations originelles sur les sources potentielles des sédiments, leurs composition et leurs voies de transfert dans le bassin étudié.

**Mots-clefs:** analyse systémique, le bassin versant de la rivière Jiu, charbon, la dynamique hydrosédimentaire, échelles spatiales et temporelles, crues

## Abstract

The doctoral thesis titled “**The Hydro-sedimentary dynamics of the Jiu River Watershed. A systemic and multi-scale approach**” aimed to investigate the dynamics of liquid and solid flows at various temporal and spatial scales, in the Jiu River Basin. The study area covers 10,080 km<sup>2</sup> and is located in southwestern Romania (in Oltenia Region), Jiu River (339 km long) being one of the most important tributaries of the Danube in this part of Romania.

In the current context, marked by the need to elaborate complex and integrated watershed management plans, that should include the wide range of natural and human factors controlling liquid and solid discharge and their associated processes, the present study offers valuable and original information on the hydro-sedimentary dynamics in the Jiu River watershed, that stems from a cross-disciplinary research carried out at different temporal and spatial scales.

The watershed under study is characterized by complex geographical particularities, determined by a great diversity of natural and socio-economic factors. From an economic standpoint, the element that individualizes Jiu’s watershed is the presence and exploitation of coal in its upper sector (black coal) and middle sector (lignite), activities that have left their mark on the hydrological characteristics of the rivers in the basin. The presence of coal resources has been relied upon in this paper in order to investigate the hydro-sedimentary dynamics on the basis of an analysis, carried out through different laboratory methods, of the coal associated elements’ content in the alluvium samples collected in the riverbeds of Jiu and its main tributaries. The use of coal as a hydro-sedimentary tracer represents an original feature of the thesis.

The present research seeks to answer the following two major questions:

*(i) Which are the natural and human factors that contribute to the production and transfer of the solid and liquid fluxes within the Jiu River basin and what role do they play in the hydro-sedimentary dynamics?*

*(ii) What is the importance of spatial and temporal scales in the analysis of the hydro-sedimentary dynamics with regards to sediment sources, extreme hydrological events, transfer paths and the most favorable accumulation areas?*

The scientific methodology that we adopted followed a perspective that shifted from the general to the specific.

*In the first part of the thesis*, the analysis was carried out at the scale of the whole basin, in order to highlight the physico-geographical factors, as well as the man-made ones, controlling the liquid and solid fluxes. The issues that we approached refer to the connectivity between sources – transfer – accumulation areas, hydrological variability and the relationship between the solid and the liquid discharge, the geomorphological mapping of alluvium-generating processes.

*In the second part of the thesis*, we shifted from the systemic perspective of the whole Jiu River Basin towards a smaller scale, both spatially and temporally, able to reflect the role of extreme hydrological events (the largest floods recorded in Jiu River Basin) in the hydro-sedimentary dynamics and the contribution of its main sub catchments in the sediment transfer. From a methodological point

of view, in this part of the thesis we moved from the classical, geographical and hydrological methods, employed in the first part (based on mapping and the spatial analysis in a GIS environment, as well as by statistical processing of data series) towards a complex methodology, integrating hydrological analysis (on the basis of flood indices), field research (the identification of a sediment deposition site) and the complex analysis of fine sediments in the laboratory (through techniques belonging to colorimetric tracing, geochemistry, organic petrology).

The results of our research connected the elements and factors behind the hydro-sedimentary dynamics at various spatial and temporal scales into a systemic vision. The laboratory analyses (at micron scale of the sediment sample), the study of flood events (at daily, seasonal and annual timescale and at the level of the sub-catchments) and the hydrological, geographical and geomorphological analyses of Jiu watershed's particularities have contributed to a better understanding of the hydro-sedimentary dynamics, offering original insight into potential sediment sources, the composition and quantity of sediments and the transfer paths they follow in the system of Jiu River's watershed.

**Key words:** systemic analysis, Jiu River watershed, coal, hydro-sedimentary dynamics, spatial and temporal scales, flash floods

## Rezumat

Lucrarea de doctorat cu titlul « **Dinamica hidro-sedimentară a bazinului râului Jiu. Abordare sistemică și multiscalară** » și-a propus să cerceteze modul în care se realizează dinamica fluxurilor lichide și solide în cadrul bazinului hidrografic al râului Jiu, la diferite scări spațiale și temporale. Bazinul supus cercetării se extinde pe o suprafață de 10080 km<sup>2</sup> în partea de sud-vest a României (în regiunea Olteniei), râul Jiu (cu o lungime de 339 km) fiind unul dintre cei mai importanți afluenți ai Dunării din această parte a țării.

În contextul actual al necesității elaborării unor planuri de management bazinal cât mai complexe, cu caracter integrat, care să includă ansamblul factorilor naturali și antropici care controlează scurgerea lichidă și solidă și procesele asociate, prezenta lucrare oferă informații valoroase și originale privind dinamica hidro-sedimentară din bazinul Jiului, rezultate dintr-o abordare transdisciplinară la diferite scări spațiale și temporale.

Bazinul studiat se caracterizează prin particularități geografice complexe, impuse de diversitatea factorilor naturali (geologici, morfologici, climatici, edafici, fitologici) și socio-economici. Din punct de vedere economic, un element care conferă individualitate bazinului Râului Jiu îl reprezintă prezența și exploatarea cărbunelui în sectorul superior (hulă) și cel mijlociu (lignit). Existența resurselor de cărbune a fost valorificată în prezenta lucrare pentru a studia dinamica hidro-sedimentară pe baza analizei, prin diferite metode de laborator, a conținutului de cărbune și a elementelor asociate din eșantioanele de aluviuni recoltate din albia râului Jiu și a principalilor afluenți. Considerăm că utilizarea cărbunelui ca trasor hidro-sedimentar reprezintă un element de originalitate al acestei lucrări.

Teza își propune să răspundă următoarelor întrebări principale:

**1. Care sunt factorii naturali și antropici care contribuie la producția și transferul fluxurilor lichide și solide la nivelul bazinului râului Jiu și care este rolul acestora în dinamica hidro-sedimentară?**

**2. Care este importanța scărilor spațiale și temporale în analiza dinamicii hidro-sedimentare în ceea ce privește sursele de sedimente, evenimentele hidrologice extreme, căile de transfer și zonele predilecte de acumulare ?**

Demersul metodologic adoptat a urmărit o optică de la general la particular.

*În prima parte a tezei*, analizele se realizează la scara întregului bazin în vederea evidențierii particularităților factorilor fizico-geografici și antropici care controlează fluxurile lichide și solide. Aspectele tratate se referă și la conectivitatea sursă – transfer – zonă de depunere, variabilitatea hidrologică și relația dintre debitul lichid și solid, cartarea proceselor geomorfologice generatoare de aluviuni.

*În cea de-a doua parte a tezei*, de la perspectiva sistemică asupra întregului bazin al râului Jiu se ajunge la o scară mai redusă, atât din punct de vedere spațial cât și temporal, pentru a identifica rolul evenimentelor hidrologice extreme (viiturile cele mai mari înregistrate în bazinul râului Jiu) în dinamica hidro-sedimentară și contribuția sub-bazinilor la transferul sedimentelor fine. Din punct de vedere metodologic, în această parte a tezei se trece de la metodele clasice geografice și hidrologice utilizate în

prima parte a lucrării (bazate pe reprezentarea cartografică și analiza spațială în mediul SIG și pe prelucrarea statistică a seriilor de date), la o metodologie complexă, ce integrează analiza hidrologică (pe baza unor indici de viituri), cercetarea de teren (identificarea unui sit de acumulare a sedimentelor și prelevarea de eșantioane) și analiza sedimentelor fine în laborator (utilizând tehnicile colorimetrice, geochimice și ale petrologiei organice).

Rezultatele cercetării au pus în legătură factorii dinamicii hidro-sedimentare la diferite scări spațio-temporale, într-o viziune sistemică. Analizele de laborator (scara micronică a eșantionului), cele ale viiturilor (la scară diurnă, sezonieră și anuală și contribuția sub-bazinelor hidrografice), precum și cele ale particularităților hidrologice, geografice și geomorfologice la nivelul bazinului râului Jiu contribuie la o mai bună cunoaștere a dinamicii hidro-sedimentare, oferind informații originale privind sursele potențiale de sedimente, compoziția lor și modalitățile de transfer ale acestora la nivelul bazinului hidrografic studiat.

**Cuvinte cheie:** analiză sistemică, bazinul hidrografic al râului Jiu, cărbuni, dinamica hidro-sedimentară, scări spațio-temporale, viituri

## Liste des figures

Figure	Pg
<b>Figure II.1.</b> Le concept de système fluvial	<b>13</b>
<b>Figure II.2.</b> La structure de la cascade de sédiments des zones source vers les zones de dépôt des sédiments et la continuité relative des sédiments dans chaque stockage en l'absence de crue	<b>14</b>
<b>Figure II.3.</b> Vecteurs d'altération du système fluvial de l'Isère (b.v. du Rhône)	<b>15</b>
<b>Figure II.4.</b> Schéma de l'équilibre dynamique entre les facteurs de contrôle et de réponse d'un système fluvial	<b>15</b>
<b>Figure II.5.</b> Approches complexes dans la géomorphologie fluviale et les sciences connexes du système fluvial, budget des sédiments, flux de sédiments et milieux de stockages	<b>16</b>
<b>Figure II.6.</b> L'hydrosystème avec ses 3 axes	<b>17</b>
<b>Figure II.7.</b> La représentation des processus d'érosion, transport et accumulation sous la forme d'un tapis roulant	<b>18</b>
<b>Figure II.8.</b> Illustration des trois zones longitudinales d'un système fluvial (ou bien les 3 zones de la première dimension s'un hydrosystème. L'exemple du bassin de la rivière Motru, affluent de premier ordre de la rivière Jiu	<b>19</b>
<b>Figure II.9.</b> L'idéalisation du système fluvial, du système partiel et du hydrosystème	<b>21</b>
<b>Figure II.10.</b> Les échelles spatio-temporelles d'analyse du système fluvial	<b>22</b>
<b>Figure II.11.</b> Liens et découplages spatio-temporelles entre géoarchéologie, stratigraphie, hydrologie et géomorphologie fluviale	<b>23</b>
<b>Figure II.12.</b> Schéma de la fréquence de l'utilisation des échelles spatiales et temporelles dans l'étude des systèmes fluviaux	<b>24</b>
<b>Figure II.13.</b> L'importance de l'échelle spatiale choisie dans les analyses cartographiques d'un système fluvial	<b>27</b>
<b>Figure II.14.</b> Schéma de base d'une analyse de connectivité	<b>30</b>
<b>Figure II.15.</b> Schématisation des échelles spatiales et temporelles comprises par différentes catégories de mesures et analyses hydrologiques, hydro-sédimentaires et géomorphologiques	<b>32</b>
<b>Figure III.1.</b> Le bassin versant de la rivière Jiu et sa localisation	<b>46</b>
<b>Figure III.2.</b> Repérage hydrologique du bassin de la rivière Jiu	<b>48</b>
<b>Figure III.3.</b> Caractéristiques principales administratif-territoriales	<b>49</b>
<b>Figure III.4.</b> La carte géologique du bassin de la rivière Jiu	<b>51</b>
<b>Figure III.5.</b> La carte hypsométrique du bassin de la rivière Jiu	<b>54</b>
<b>Figure III.6.</b> Les unités morphologiques du bassin de la rivière Jiu en conformité avec la Carte des Unités de Relief de la Roumanie	<b>55</b>
<b>Figure III.7.</b> Le profil longitudinal de la rivière Jiu	<b>57</b>
<b>Figure III.8.</b> Secteur de gorges dans la vallée de Sohodol dans le secteur supérieur de la rivière de Runcu (aout 2017): <b>a.</b> vallée type canyon ; <b>b.</b> système de caves (nommé « Les narines »)	<b>60</b>
<b>Figure III.9.</b> La vallée de la rivière Jiu dans le secteur des gorges : <b>a.</b> Secteur avec le lit pavé des galets ; <b>b.</b> La rivière Jiu à la sortie des gorges, vers la Dépression subcarpatique de Târgu Jiu	<b>60</b>
<b>Figure III.10.</b> Relief dépressionnaire subcarpatique : <b>a.</b> Vallée de la Gilort dans la dépression de Novaci (février 2016); <b>b.</b> Vallée de la Jiu dans la dépression de Târgu Jiu (juin 2017)	<b>61</b>
<b>Figure III.11.</b> Relief typique développé sur des calcaires dans le Plateau de Mehedinți (juillet 2018): <b>a.</b> Pont naturel karstique, connu sur le nom de « Pont de Dieu », utilisé comme voie routière; <b>b.</b> Champ des lapiaz ; <b>c.</b> Le système de lacs karstiques (le lac Zăton) en période sèche (on peut distinguer la cuvette seulement), délimité par la ligne bleue ; et <b>d.</b> la cave de Ponoarele	<b>62</b>
<b>Figure III.12.</b> Relief collinaire dans le Piémont Gétique : <b>a.</b> Les collines de Coșuștea (mai 2016); <b>b.</b> Les collines de Jiłț dans la zone d'exploitation du lignite (juin 2017)	<b>63</b>
<b>Figure III.13.</b> Relief de plaine au long de la rivière Jiu : <b>a.</b> La plaine dans le secteur inférieur aval Craiova (juillet 2017); <b>b.</b> Le champ d'inondation de la Jiu en aval de Zăval, avec une ouverture de dépôts de lœss sur le front de la terrasse (février 2016)	<b>64</b>
<b>Figure III.14.</b> Corrélation entre la température moyenne multiannuelle et l'altitude des stations météorologiques analysées. Toutes les 13 stations ont été utilisées pour obtenir la régression	<b>66</b>
<b>Figure III.15.</b> Variation spatiale de la température moyenne annuelle de l'air dans le bassin de la Jiu	<b>67</b>

<b>Figure III.16.</b> Variabilité des températures moyennes annuelles (1961 – 2013) aux stations situées dans le b.v. de la rivière Jiu	<b>68</b>
<b>Figure III.17.</b> Boite à moustaches des températures minimales	<b>69</b>
<b>Figure III.18.</b> Boite aux moustaches des températures maximales mensuelles	<b>69</b>
<b>Figure III.19.</b> Variation des températures moyennes mensuelles dans la région d'étude (1961 – 2013)	<b>70</b>
<b>Figure III.20.</b> Corrélation entre les précipitations annuelles (moyennes pour la période 1961 – 2013) et l'altitude des stations analysées	<b>71</b>
<b>Figure III.21.</b> Répartition des précipitations annuelles (moyennes pour la période 1961 – 2013) dans le bassin de la rivière Jiu	<b>72</b>
<b>Figure III.22.</b> Variation pluri-annuelle des précipitations maximales mensuelles aux 8 stations étudiées	<b>73</b>
<b>Figure III.23.</b> Fréquence des types des années pluviométriques aux stations analysées en fonction du critère de Hellman	<b>74</b>
<b>Figure III.24.</b> Système de classification de l'ISP	<b>75</b>
<b>Figure III.25.</b> Evolution de l'indice standardisé des précipitations (ISP) pour la période 1961 – 2013	<b>76</b>
<b>Figure III.26.</b> Fréquence des mois avec excédent pluviométrique aux stations météorologiques analysées (1961 – 2013), conformément à l'ISP	<b>77</b>
<b>Figure III.27.</b> Répartition par la méthode du krigeage des précipitations mensuelles moyennes, minimales et maximales aux stations étudiées pour la période 1961 – 2013	<b>78</b>
<b>Figure III.28.</b> La classification des mois en fonction des valeurs de l'indice de pluie extrême (IPE) aux stations analysées (période 1961 – 2013)	<b>79</b>
<b>Figure III.29.</b> Diagrammes Péguy aux 8 stations météorologiques analysées (1961 – 2013) : a. Craiova; b. Bechet; c. Obârșia Lotrului; d. Padeș; e. Parâng; f. Petroșani; g. Târgu Jiu; h. Târgu Logrești	<b>80</b>
<b>Figure III.30.</b> Le bassin hydrographique de la rivière Jiu et les bassins voisins	<b>81</b>
<b>Figure III.31.</b> La représentation schématique du développement du bassin de la rivière Jiu.	<b>83</b>
<b>Figure III.32.</b> La distribution du bassin hydrographique de la rivière Jiu par classes altitudinales	<b>84</b>
<b>Figure III.33.</b> Le bassin de la rivière Jiu et les sous-bassins de ses plus grands affluents	<b>86</b>
<b>Figure III.34.</b> Les cartes de densité de drainage du réseau (A) et hydrographique (B)	<b>91</b>
<b>Figure III.35.</b> La classification du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Jiu par la méthode de Strahler	<b>93</b>
<b>Figure III.36.</b> Statistique des segments de différents ordres selon la classification de Strahler. Relation entre l'ordre Strahler et la longueur du segment	<b>94</b>
<b>Figure III.37.</b> La répartition des sols dans le bassin de la rivière Jiu (adaptation selon la carte roumaine des unités pédologiques à l'échelle de 1:200.000)	<b>97</b>
<b>Figure III.38.</b> La répartition des groupes hydrologiques selon les classes texturales (A, B, C et D) du sol dans le bassin de la rivière Jiu	<b>100</b>
<b>Figure III.39.</b> Carte de l'utilisation des sols dans le bassin de la rivière Jiu (CLC, 2018)	<b>101</b>
<b>Figure III.40.</b> Les étapes de réalisation d'une base de données cartographique CLC corrigée	<b>102</b>
<b>Figure III.41.</b> Gains et pertes en superficie résultats du changement de classe CLC ou de l'ajustement des limites de certaines classes	<b>105</b>
<b>Figure III.42.</b> La statistique de l'occupation des sols dans le bassin de la rivière Jiu, selon la base de données Corine Land Cover 2018, corrigée	<b>106</b>
<b>Figure III.43.</b> Unités administratives et population : A. La localisation des villes dans le bassin de la rivière Jiu ; B. La population des unités administratives territoriales ; C. La répartition de la population selon les milieux urbain et rural (synthèse sur les 4 départements).	<b>107</b>
<b>Figure III.44.</b> La localisation des bassins d'exploitation du charbon et des réservoirs dans le bassin de la rivière Jiu	<b>108</b>
<b>Figure III.45.</b> Le bassin charbonnier de Petroșani (Champ minier «La Vallée de la Jiu »)	<b>110</b>
<b>Figure III.46.</b> La carte du bassin charbonnier de Motru – Rovinari et des exemples de photos de chacun des 4 champs miniers	<b>111</b>
<b>Figure III.47.</b> Aménagements existants ou en construction sur la rivière Jiu entre la sortie du secteur montagne et la ville de Târgu Jiu	<b>113</b>
<b>Figure III.48.</b> Schéma de l'aménagement hydrotechnique complexe Cerna - Motru – Tismana	<b>114</b>
<b>Figure III.49.</b> Le flux de travail pour la classification des changements dans les superficies forestières du bassin supérieur de la rivière Jiu dans la période 2000 – 2012	<b>118</b>
<b>Figure III.50.</b> Représentation des modifications de la végétation forestière (1990-2012) survenant dans la partie supérieure du bassin de la rivière Jiu	<b>119</b>
<b>Figure IV.1.</b> La définition de la TTMD schématisée	<b>124</b>
<b>Figure IV.2.</b> Le bassin versant de la rivière Jiu et les points de mesure de la TTMD	<b>125</b>

<b>Figure IV.3.</b> Cartes de la spatialisation des variables prédictives géologiques et pédologiques utilisées dans l'analyse multivariée dans le b.v. de la rivière Jiu	129
<b>Figure IV.4.</b> Distribution spatiale des catégories de la couverture du sol considérées comme facteurs susceptibles pour la variation des TTMD dans les rivières du b.v. de la Jiu (à gauche) et situation des superficies affectées par différentes destinations de l'utilisation du terrain (à droite)	131
<b>Figure IV.5.</b> Diagramme des composantes ACP	132
<b>Figure IV.6.</b> Valeurs tournées de la contribution de chaque variable à l'ACP	133
<b>Figure IV.7.</b> Tendances et modèles dans le partage des caractéristiques communes des bassins versants situés en amont des points de mesure	133
<b>Figure IV.8.</b> Corrélations post-régression (TTDM prévu et valeurs explicatrices)	134
<b>Figure IV.9.</b> Les zones ciblées pour la cartographie des processus géomorphologiques dans le b.v. Jiu	136
<b>Figure IV.10.</b> Schéma conceptuel du budget d'alluvions ajusté à la problématique des sources de sédiments fins dans le bassin de la rivière Jiu	137
<b>Figure IV.11.</b> Schéma des 5 processus géomorphologiques cartographiés. <b>A</b> – Glissements de terrain ; <b>B</b> - Ravines ; <b>C</b> - Coulées ; <b>D</b> - Chutes de pierres ; <b>E</b> - Erosion en superficie (ou en nappe)	139
<b>Figure IV.12.</b> Représentation des processus géomorphologiques cartographiés le long des rivières principales : <b>A</b> – La fréquence absolue des processus géomorphologiques et leur profondeur ; <b>B</b> – La répartition des processus géomorphologiques sur les rivières ; <b>C</b> – La carte des processus géomorphologiques en fonction de leur superficie	146
<b>Figure IV.13.</b> Trois exemples de glissements de terrain différenciés par leur profondeur	146
<b>Figure IV.14.</b> Exemples de processus géomorphologique cartographié : coulées, ravines, chutes de pierres, érosion en nappe	147
<b>Figure IV.15.</b> Statistique des superficies occupées par les processus géomorphologiques selon les formations lithologique	148
<b>Figure IV.16.</b> La répartition spatiale des processus géomorphologiques selon la lithologie	150
<b>Figure IV.17.</b> Proportion des groupes lithologiques associées aux processus géomorphologiques	151
<b>Figure IV.18.</b> La répartition spatiale des tas de stériles dans les deux bassins d'extraction du charbon: <b>A.</b> Secteur supérieur de la rivière Jiu; <b>B.</b> Secteur moyen	153
<b>Figure IV.19.</b> Deux exemples de localisation des tas de stérile (terril) dans les bassins de la Jiu de l'Est (à gauche) et Motru – Rovinari (à droite)	154
<b>Figure IV.20.</b> La lithologie des endroits avec des terrils de charbon affectés par les processus géomorphologiques	154
<b>Figure IV.21.</b> Exemples des endroits d'extraction de granulats (gravières) sur les rivières du b.v. Jiu	154
<b>Figure IV.22.</b> Les formes d'accumulation dans les lits des rivières	155
<b>Figure IV.23.</b> La position des formes d'accumulation dans les lits des rivières par rapport aux gravières. <b>A.</b> La Jiu à Bumbesti Jiu ; <b>B.</b> Confluence entre les rivières Bratcu et Jiu dans le secteur des gorges ; <b>C.</b> Confluence entre les rivières Porcul et Amaradia Pietroasă ; <b>D.</b> La rivière Gilort	156
<b>Figure IV.24.</b> Relation de distance entre les gravières et les accumulations de lit (ligne rouge) et entre les tas de stériles et les rivières (ligne bleue)	157
<b>Figure IV.25.</b> Relation entre le nombre des processus de versant et la distance par rapport aux formes d'accumulation (les cordons de sable)	157
<b>Figure IV.26.</b> Relation entre le nombre de processus géomorphologiques et la distance par rapport aux terrils de charbon	158
<b>Figure IV.27.</b> Les trois types d'obstacles dans la connectivité sédimentaire ( <i>zones tampons ; barrières ; couvertures</i> ) (les photos sont tirées lors de nos missions de terrain dans le b.v. Jiu)	161
<b>Figure IV.28.</b> Illustration schématique de la connectivité et la dis-connectivité latérales	162
<b>Figure IV.29.</b> Le concept et les composantes pour le calcul de l'indice de connectivité (IC)	165
<b>Figure IV.30.</b> Le schéma des étapes de calcul de l'indice de connectivité (IC)	168
<b>Figure IV.31.</b> La comparaison entre les deux modèles altitudinaux utilisés	169
<b>Figure IV.32.</b> Le schéma de mosaïquage des deux modèles numériques de terrain (ALOS Palsar pour le bassin de la rivière Jilț et EU-DEM pour le reste du bassin de la Jiu)	170
<b>Figure IV.33.</b> Les changements altimétriques (DoD) entre 1980 et après 2000 pour le bassin de la rivière Jiu (à droite en haut) et pour le bassin de la rivière Jilț (à gauche et en bas de la partie droite)	172
<b>Figure IV.34.</b> Le seuillage du réseau hydrographique en fonction de la proximité des objectifs miniers dans le bassin versant de la Jiu. Les seuils choisis à représenter correspondent aux valeurs maximales, minimale et aux deux des valeurs intermédiaires de la superficie de drainage amont des pixels considérés sources du réseau à chaque essai	173



<b>Figure IV.35.</b> L'extension de la zone tampon le long d'un secteur de rivière (la rivière Jiu entre Răcari et Podari), selon différentes sources cartographiques : <b>A.</b> Réseau hydrographique et plaine alluviale délimités manuellement sur une image aérienne de 2012 ; <b>B.</b> Les catégories hydrauliques de couverture du sol selon la carte topographique et l'image aérienne de 2012 ; <b>C.</b> Réseau hydrographique seuillé, avec une zone tampon délimité automatiquement sur le modèle numérique altitudinal	175
<b>Figure IV.36.</b> Les éléments hydrographiques cibles pour le calcul de la connectivité : a. Le réseau hydrographique seuillé avec la zone tampon ; b. l'embouchure de la rivière Jiu dans le Danube ; c. La considération du polygone autour du réservoir Vădeni	176
<b>Figure IV.37.</b> Le schéma de calcul de l'impédance topographique (RI) et l'IC	177
<b>Figure IV.38.</b> Les cartes des facteurs de pondération de l'impédance topographique : <b>a.</b> La carte de l'indice « n » de Manning ; <b>b.</b> La carte de l'indice de rugosité « RI » automatiquement obtenue en SedInConnect pour le modèle numérique altitudinal de l'année 1980 ; <b>c.</b> La carte de l'indice de rugosité « RI » automatiquement obtenue en SedInConnect pour le modèle numérique altitudinal d'après 2000	178
<b>Figure IV.39.</b> Les cartes de la connectivité dans le bassin de la rivière Jiu	180
<b>Figure IV.40.</b> Changements dans la connectivité entre les années 1980 et 2000 pour les bassins des rivières Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Jilt	182
<b>Figure IV.41.</b> Les cartes de la connectivité dans le bassin de la rivière Jiu pour la situation après 2000: <b>A.</b> En utilisant l'indice de rugosité RI; <b>B.</b> En utilisant l'indice de Manning « n »	183
<b>Figure IV.42.</b> La connectivité sédimentaire des principaux sous-bassins au niveau des années 2000	184
<b>Figure IV.43.</b> La connectivité maximale des carrières de charbon. Analyse comparative 1980 et 2000	185
<b>Figure IV.44.</b> Les facteurs principaux englobés dans l'équation RUSLE	189
<b>Figure IV.45.</b> La carte du taux d'érosion [t/ha/an] du bassin de la rivière Jiu selon la méthode RUSLE	190
<b>Figure IV.46.</b> Exemples de zones caractérisées par une connectivité potentielle importante (moyenne – haute et haute) et un taux d'érosion supérieur à 50 t/ha.an dans le bassin de la rivière Jiu	192
<b>Figure V.1.</b> Exemples de stations hydrométriques dans le bassin de la rivière Jiu	195
<b>Figure V.2.</b> La répartition spatiale des stations hydrométriques dans le bassin de la rivière Jiu	195
<b>Figure V.3.</b> L'étendue des séries de débits liquides disponibles à chacune des 75 stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu dans la période 1950 – 2013	196
<b>Figure V.4.</b> La bouteille de prélèvement des échantillons d'eau de rivière pour la mesure de la concentration en alluvions en suspension	199
<b>Figure V.5.</b> Le schéma des bathomètres : <b>A</b> – Le bathomètre rapide ; <b>B</b> – Le bathomètre lente à vacuum	200
<b>Figure V.6.</b> Résultats des tests de stationnarité et homogénéité pour les 56 stations hydrométriques étudiées (à la base des séries de débits liquides annuels)	208
<b>Figure V.7.</b> Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique d'Iscroni, sur la rivière Jiu de l'Ouest (période d'analyse 1955 – 2013)	209
<b>Figure V.8.</b> Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Valea de Pești, la rivière Valea de Pești (période d'analyse 1987 – 2013)	210
<b>Figure V.9.</b> Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Closani, la rivière Motru (période d'analyse 1966 – 2013)	210
<b>Figure V.10.</b> Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Godinești, rivière Tismana. Homogénéité interrompue en 1984 (période d'analyse 1954 – 2013)	211
<b>Figure V.11.</b> Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Turburea, rivière Gilort (période d'analyse 1951 – 2013)	211
<b>Figure V.12.</b> Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Podari, rivière Jiu (période d'analyse 1950 – 2013)	212
<b>Figure V.13.</b> Variabilité des débits moyens annuels d'alluvions en suspension à s.h Podari (1976-2010)	213
<b>Figure V.14.</b> La distribution de la fréquence relative des débits des alluvions en suspension (R) de la rivière Jiu mesurés et estimés à la station hydrométrique de Podari (2001 – 2010)	215
<b>Figure V.15.</b> Les boîtes à moustaches des débits d'alluvions en suspension (kg/s) de la rivière Jiu à la station hydrométrique Podari (2001 - 2010)	215
<b>Figure V.16.</b> Résultats de l'application du test de normalité Anderson – Darling à la station Podari sur la rivière Jiu (séries de données de 2001 à 2010)	216
<b>Figure V.17.</b> Les densités des valeurs et les paramètres statistiques correspondants aux deux tests utilisés (Fisher – à gauche ; T test – à droite)	217
<b>Figure V.18.</b> Le débit moyen spécifique multiannuel ( $q_0, l \cdot s^{-1} \cdot km^2$ ) dans le bassin de la rivière Jiu	222
<b>Figure V.19.</b> Le débit maximal spécifique multiannuel ( $q_{max}, l \cdot s^{-1} \cdot km^2$ ) dans le bassin de la Jiu	224
<b>Figure V.20.</b> Carte du paramétré Z du test Mann – Kendall appliqué sur les débits liquides moyens annuels aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu	228
<b>Figure V.21.</b> Carte du paramètre Z du test Mann – Kendall appliqué sur les débits liquides maximaux annuels aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu	232

<b>Figure V.22</b> Histogrammes des débits annuels aux stations de la rivière Jiu. Les lignes noires représentent les tendances de ces débits, tandis que les lignes rouges la moyenne multi-annuelle	233
<b>Figure V.23.</b> Variabilité spatiale des débits moyens annuels aux stations hydrométriques de la Jiu	235
<b>Figure V.24.</b> Variabilité des débits maximaux annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu	236
<b>Figure V.25.</b> Classification des années de la période 1983 – 2013 selon la magnitude des débits maximaux annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu	237
<b>Figure V.26.</b> La relation entre les débits moyens multiannuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu et l'altitude et la pente du profil en long	238
<b>Figure V.27.</b> La relation entre les débits moyens annuels (Q) aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et la superficie de leurs bassins versants (km <sup>2</sup> )	239
<b>Figure V.28.</b> La relation entre les débits moyens annuels spécifiques aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et l'altitude (A) et avec la pente du bassin versant (B)	239
<b>Figure V.29.</b> La région du système karstique Mehedinti dans le bassin supérieur de la rivière Motru (avec son sous-bassin de la rivière Coșuștea) : <b>A.</b> Relation entre le débit moyen spécifique (q) est l'altitude (Alt) ; <b>B.</b> Relation entre le débit moyen (Q) et la superficie (F)	240
<b>Figure V.30.</b> La région du système karstique et avec des aménagements hydro-énergétiques dans le bassin supérieur de la rivière Tismana : <b>A.</b> Relation entre le débit moyen spécifique (q) et l'altitude (Alt) ; <b>B.</b> Relation entre le débit moyen (Q) et la superficie (F)	241
<b>Figure V.31.</b> La relation entre les débits spécifiques moyens et maximaux multiannuels aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et le coefficient de boisement (%)	241
<b>Figure V.32.</b> La variation mensuelle des débits moyens (en % du volume moyen multiannuel) aux stations hydrométriques sur la rivière Jiu (1984 - 2013)	243
<b>Figure V.33.</b> La variabilité des débits moyens mensuels à la station hydrométrique de Podari, la rivière Jiu (1950 – 2015)	244
<b>Figure V.34.</b> La variation saisonnière des volumes moyens aux stations hydrométriques sur la rivière Jiu (1984 - 2013)	245
<b>Figure V.35.</b> La répartition saisonnière des volumes moyens des sous-bassins principaux de la rivière Jiu. <b>A</b> - les sous-bassins des affluents principaux ; <b>B</b> - les sous-bassins des stations hydrométriques sur la rivière Jiu	246
<b>Figure V.36.</b> La synthèse des résultats du test de Mann-Kendall et la pente du Sen pour les débits moyens mensuels (1984 – 2013).	247
<b>Figure V.37.</b> Les mois où les débits maximaux annuels se sont produits et leur fréquence (%) durant la période 1984 - 2013	248
<b>Figure V.38.</b> La synthèse des résultats du test de Mann-Kendall et la pente du Sen pour les débits maximaux mensuels (1984 – 2013)	249
<b>Figure V.39.</b> La spatialisation des 6 plus grandes crues aux stations hydrométriques analysées	253
<b>Figure V.40.</b> Illustration des paramètres d'une onde de crue et du débit de base selon le modèle à pente constante (la crue d'octobre 1972 à s.h. Podari, rivière Jiu)	255
<b>Figure V.41.</b> Schéma de travail dans l'estimation de la vitesse de propagation des crues	258
<b>Figure V.42.</b> Représentation cartographique de la vitesse des crues dans le bassin de la rivière Jiu : a – les vitesses moyennes de propagation des crues et b – les vitesses maximales de propagation des crues ; c – les vitesses minimales de propagation des crues	259
<b>Figure V.43.</b> La variation des vitesses (a - moyennes et b - maximales) de propagation des crues dans le bassin de la rivière Jiu	260
<b>Figure V.44.</b> La carte du débit moyen solide spécifique ( $r$ , t·an <sup>-1</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) dans le bassin de la rivière Jiu	263
<b>Figure V.45.</b> La carte des matières solides en suspension (MES, g·l <sup>-1</sup> ) dans le bassin de la rivière Jiu	264
<b>Figure V.46.</b> La variation du taux de contribution (%) de la quantité de matières solides dans le jour de maximum par rapport au volume total de matières solides de l'année	265
<b>Figure V.47.</b> La variation saisonnière des quantités d'alluvions en suspension par rapport au volume total de matières solides de l'année dans le bassin de la rivière Jiu (2001 – 2010)	267
<b>Figure V.48.</b> Les années 1991 – 1992. Une relation débit liquide (Q) – débit des alluvions en suspensions (R) gouvernée par les activités minières en amont	269
<b>Figure V.49.</b> La hiérarchisation des 5 crues étudiées selon leurs apports en alluvions	270
<b>Figure V.50.</b> La spatialisation des crues analysées aux 22 stations hydrométriques, en fonction du débit des alluvions en suspension maximal produit ( $R_{\max \cdot crue}$ , kg·s <sup>-1</sup> )	271
<b>Figure V.51.</b> L'évolution comparée du paramètre IEE durant les 10 plus grandes crues (par rapport à la station de l'embouchure, de Zăval), aux stations hydrométriques de la rivière Jiu (2001 – 2010)	273

<b>Figure V.52.</b> La classification des 22 stations hydrométriques selon les débits liquides et des alluvions en suspension (moyens et maximaux) multiannuels (afin de montrer tout l'écart des valeurs, celles-ci ont été normalisées)	276
<b>Figure V.53.</b> Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. <b>A</b> (relation linéaire): s.h. Turburea, r. Gilort (Avril 2006)	280
<b>Figure V.54.</b> Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. <b>B</b> (relation directe): s.h. Turburea, r. Gilort (Novembre 2004)	280
<b>Figure V.55.</b> Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. <b>C</b> (relation indirecte) : s.h. Turceni, r. Jilț (Novembre 2007)	280
<b>Figure V.56.</b> Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. <b>D</b> (relation sous la forme de 8) : s.h. Iscroni, r. Jiu (Avril 2003)	281
<b>Figure V.57.</b> Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. <b>E</b> (relation complexe) - E <sub>1</sub> : s.h. Bărbățeni, r. Jiu de l'Ouest (Novembre 2004) et E <sub>2</sub> : s.h. Podari, r. Jiu (Novembre 2004)	281
<b>Figure V.58.</b> Relations hystérétiqes dominantes aux stations hydrométriques du bassin de la Jiu	283
<b>Figure V.59.</b> La localisation des 22 bassins versant en amont des stations hydrométriques utilisées	284
<b>Figure V.60.</b> Flux de travail de l'analyse des relations entre les débits solides et les paramètres morpho-lithologiques des bassins versants	286
<b>Figure V.61.</b> Les relations entre les MES multi-annuelles et différents paramètres morpho-lithologiques des bassins versant étudiés : <b>A</b> – MES ~ l'altitude moyenne ; <b>B</b> – MES ~ la superficie ; <b>C</b> – MES ~ la densité de drainage ; <b>D</b> - MES ~ les formations sédimentaires argileuses	287
<b>Figure V.62.</b> Les résultats de l'analyse en composantes principales de la relation entre la concentration des matières en suspension et les paramètres morpho-lithologiques étudiés	287
<b>Figure V.63.</b> Les résultats de l'analyse Cluster sur les groupes d'appartenance de sous-bassins (stations hydrométriques) aux mêmes caractéristiques morpho-lithologiques	289
<b>Figure V.64.</b> Les paramètres morpho-lithologiques explicatifs les plus corrélés avec les MES <sub>max,multiannuels</sub> et MES <sub>moy,multiannuels</sub>	289
<b>Figure VI.1.</b> Synthèse sur la notion de budget sédimentaire en relation avec les enjeux de la recherche	297
<b>Figure VI.2.</b> Modes de transport des sédiments dans une rivière	299
<b>Figure VI.3.</b> Schéma de sédimentation	300
<b>Figure VI.4.</b> L'effluence sédimentaire (flux des alluvions en suspensions) aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu ( $W_{\text{anuel.2001-2010}}$ , t/an)	301
<b>Figure VI.5.</b> Sortie des gorges – Târgu Jiu : Secteur de réglage entre l'équilibre et le déséquilibre sédimentaire de la rivière Jiu	302
<b>Figure VI.6.</b> Le secteur Târgu Jiu – Rovinari, en aval des réservoirs Târgu Jiu et Vădeni.	303
<b>Figure VI.7.</b> Les deux types de batomètres (piège vs. écran) utilisés en Roumanie pour la mesure des sédiments transportés par charriage. <b>A</b> – Batomètre pièce (capcane) ; <b>B</b> – Batomètre écran	304
<b>Figure VI.8.</b> Échelles de temps associées aux dépôts alluviaux	306
<b>Figure VI.9.</b> Colluvions vs. Alluvions. Définition schématisée	308
<b>Figure VI.10.</b> Localisation de l'archive sédimentaire étudiée	309
<b>Figure VI.11.</b> L'archive alluviale de Podari : des couches avec des caractéristiques différentes	310
<b>Figure VI.12.</b> La place du dépôt alluvial de la rivière Jiu, secteur aval, proximité de la s.h. Podari, sur l'échelle de temps	310
<b>Figure VI.13.</b> Conditions de la vitesse de déposition des particules supérieure à leur maintenance en turbulence et la formation de la berge d'accumulation	312
<b>Figure VI.14.</b> Variation des caractéristiques d'une succession de couches sédimentaires en fonction des facteurs quantitatifs et qualitatifs	313
<b>Figure VI.15.</b> Schématisation de la déformation verticale des dépôts en réponse aux mécanismes de la crue et de la décrue	314
<b>Figure VI.16.</b> La berge au droit de la tranchée à plusieurs moments dans les dernières années (Images aériennes géoréférencées)	315
<b>Figure VII.1</b> Succession des phases d'augmentation du niveau de débordement - dépôt des sédiments	320
<b>Figure VII.2.</b> Lois de régression des débits pour la station hydrométrique de Podari	323
<b>Figure VII.3.</b> Période de retour des débits à la station hydrométrique de Podari	324
<b>Figure VII.4.</b> Les courbes de tarage disponibles pour la période 2005 – 2014 et l'incertitude liée à l'absence d'équivalence du débit d'une rivière pour le même niveau d'eau à partir d'un certain seuil	326
<b>Figure VII.5.</b> Le profil en travers de la rivière Jiu à la station hydrométrique de Podari et les cotes à l'échelle	327

<b>Figure VII.6.</b> Les cotes d’alerte et les débits correspondants à la station Podari et les courbes de tarage de 2010 et 2014 (CA – 300 cm, CI – 400 cm, CP – 460 cm)	<b>328</b>
<b>Figure VII.7.</b> Les courbes de tarage de 2010 et 2014	<b>329</b>
<b>Figure VII.8.</b> Le débit à plein bord sur le tronçon de la rivière Jiu entre la s.h. Podari et la tranchée	<b>331</b>
<b>Figure VII.9.</b> Relation théorique entre le débit efficace et la courbe de magnitude – fréquence	<b>332</b>
<b>Figure VII.10.</b> La section en travers à la station hydrométrique de Podari, la rivière Jiu	<b>333</b>
<b>Figure VII.11.</b> Figure VII.11. Les deux sections en travers avec les deux aires mouillées considérées, en fonction de l’extension du débordement jusqu’à la berge droite (Sp) ou jusqu’à la digue (St)	<b>334</b>
<b>Figure VII.12.</b> La courbe de répartition du diamètre des particules de l’échantillon prélevés du lit de la rivière Jiu à s.h. Podari	<b>335</b>
<b>Figure VII.13.</b> Schéma et flux de travail du modèle de la courbe de tarage dans Hec RAS au droit de la tranchée de Podari	<b>339</b>
<b>Figure VII.14.</b> Mise en submersion de la berge lors de la crue de mai 2014 ( $Q = 859 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $H = 857 \text{ cm}$ ). Le volume total de la crue (1-11 mai 2014) a été de $4561 \cdot 10^3 \text{ l}$	<b>340</b>
<b>Figure VII.15.</b> Chronique des débits journaliers (2000 – 2016) et nombre de crues avec des débits supérieurs à $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	<b>342</b>
<b>Figure VII.16.</b> Les hydrogrammes de crue (au niveau horaire) des crues d’octobre 1972 et d’avril 2013	<b>345</b>
<b>Figure VII.17.</b> Nombre des jours à $Q_{\text{moyen,journalier}} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) > 600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par tranches de débit en relation avec la durée de la crue (à gauche) et répartition mensuelle des crues sélectionnées (à droite)	<b>345</b>
<b>Figure VII.18.</b> Contribution de chaque bassin versant par rapport au débit à Podari. Un complément de bilan été aussi calculé	<b>348</b>
<b>Figure VII.19.</b> Courbe des volumes cumulés des 5 stations étudiés pour l’année 2007	<b>348</b>
<b>Figure VII.20.</b> Le bilan des débits liquides de la crue de novembre 2007	<b>349</b>
<b>Figure VII.21.</b> La chronique des concentrations des alluvions en suspension (MES, g/l) au niveau journalier de l’année 2006 à la station Grenoble Campus sur la rivière Isère	<b>350</b>
<b>Figure VII.22.</b> La chronique des concentrations des alluvions en suspension (MES, g/l) chaque 30 min pour la crue de 1 – 25 mai 2006 à la station Grenoble Campus sur la rivière Isère	<b>350</b>
<b>Figure VII.23.</b> La relation hystérétique entre la concentration des alluvions en suspension (MES, g/l) et les débits liquides ( $Q$ , mc/s), chaque 30 min pour la crue de 1 – 25 mai 2006 à la station Grenoble Campus sur la rivière Isère	<b>351</b>
<b>Figure VII.24.</b> Schéma des niveaux d’analyse de la contribution des sous-bassins versant de la rivière Jiu à la formation des crues	<b>354</b>
<b>Figure VII.25.</b> Les bassins versant des rivières Tismana et Amaradia Pietroasa	<b>356</b>
<b>Figure VII.26.</b> Corrélations linéaires entre les débits sur les périodes communes des stations hydrométriques : A. Călnic et Godinești (rivière Tismana), respectivement B. Iasi – Gorj et Ohaba (rivière Amaradia Pietroasă)	<b>357</b>
<b>Figure VI.27.</b> Représentation schématique du Modèle GR4J avec de nouveaux ajouts sur le couplage des deux modèles	<b>358</b>
<b>Figure VII.28.</b> Les erreurs quadratiques carrés de la modélisation GR4J des débits moyens journaliers aux stations hydrométriques de Călnic (r. Tismana) et de Iasi – Gorj (r. Amaradia Pietroasă)	<b>360</b>
<b>Figure VII.29.</b> Histogramme des débits moyens journaliers ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) de la rivière Jiu à Podari	<b>361</b>
<b>Figure VII.30.</b> Représentation graphique du volume entre deux données, au-dessus d’un certain seuil	<b>363</b>
<b>Figure VII.31.</b> Représentation graphique du volume entre deux dates, entre deux seuils de débit	<b>363</b>
<b>Figure VII.32.</b> L’indice 1 pour les trois niveaux d’analyse	<b>365</b>
<b>Figure VII.33.</b> L’indice 2 pour les trois niveaux d’analyse	<b>367</b>
<b>Figure VII.34.</b> L’indice 3 pour les trois niveaux d’analyse	<b>369</b>
<b>Figure VII.35.</b> L’indice 4 pour les trois niveaux d’analyse	<b>371</b>
<b>Figure VII.36.</b> L’indice 5 pour les trois niveaux d’analyse	<b>372</b>
<b>Figure VII.37.</b> L’indice 6 pour les trois niveaux d’analyse	<b>373</b>
<b>Figure VII.38.</b> L’indice 7 pour les trois niveaux d’analyse	<b>374</b>
<b>Figure VII.39.</b> L’indice 8 pour les trois niveaux d’analyse	<b>375</b>
<b>Figure VII.40.</b> L’indice 9 pour les trois niveaux d’analyse	<b>378</b>
<b>Figure VII.41.</b> L’indice 10 pour les trois niveaux d’analyse	<b>379</b>
<b>Figure VII.42.</b> L’indice 11 pour les trois niveaux d’analyse	<b>380</b>
<b>Figure VII.43.</b> L’indice 12 pour les trois niveaux d’analyse	<b>381</b>
<b>Figure VII.44.</b> L’indice 13 pour les trois niveaux d’analyse	<b>382</b>
<b>Figure VII.45.</b> Atténuation du débit de pointe de la crue d’avril 2013 sur la rivière Jiu entre les stations hydrométriques de Filiși, Răcari et Podari	<b>384</b>

<b>Figure VIII.1.</b> Schéma des deux catégories de sites d'échantillonnage des sédiments : dans les berges et dans les lits des rivières	<b>394</b>
<b>Figure VIII.2.</b> Concept général de l'échantillonnage des sédiments des lits des rivières	<b>397</b>
<b>Figure VIII.3.</b> Échantillonnage des sédiments des lits des rivières	<b>399</b>
<b>Figure VIII.4.</b> Carte des points d'échantillonnage des sédiments fins du lit des rivières	<b>400</b>
<b>Figure VIII.5.</b> Lieux d'échantillonnage privilégiés des berges d'accumulation	<b>401</b>
<b>Figure VIII.6.</b> Localisation du site de la berge côté gauche ( $T_{\text{amont}}$ ) et coté droite ( $T_{\text{aval}}$ ) de la rivière Jiu, en amont et en aval de la station hydrométrique de Podari. Zoom sur les couches sédimentaires	<b>402</b>
<b>Figure VIII.7.</b> Schéma théorique – hypothétique de la relation crues – dépôts des alluvions	<b>404</b>
<b>Figure VIII.8.</b> La géomorphologie locale à Podari	<b>405</b>
<b>Figure VIII.9.</b> La berge en coupe transversale. Modèle numérique utilisé - résolution ALOS Palsar de 12,5 m (2012)	<b>406</b>
<b>Figure VIII.10.</b> L'évolution morphologique du site entre 2004 et 2018. Le cliché de mai 2014, lors de l'une des épisodes les plus fortes en crue, montre clairement le lien entre l'agrégation des berges et les inondations	<b>407</b>
<b>Figure VIII.11.</b> Schéma d'un échantillonnage systématique fictif	<b>409</b>
<b>Figure VIII.12.</b> Carte des points d'échantillonnage du charbon en vrac dans le bassin de la rivière Jiu	<b>411</b>
<b>Figure VIII.13.</b> Particules de sable vs. le charbon – des formes et des tailles différentes	<b>416</b>
<b>Figure VIII.14.</b> Schéma de mesure et d'ajustement de la granulométrie laser pour un échantillon exemple	<b>417</b>
<b>Figure VIII.15.</b> Protocole de la mesure de la colorimétrie	<b>420</b>
<b>Figure VIII.16.</b> Différences entre la couleur d'un échantillon propre (sans charbon) et un autre avec des particules de charbon	<b>421</b>
<b>Figure VIII.17.</b> Le schéma d'analyse colorimétrique	<b>422</b>
<b>Figure VIII.18.</b> Un exemple de protocole et résultat de la classification	<b>424</b>
<b>Figure VIII.19.</b> Les instruments de travail de la pétrologie organique	<b>428</b>
<b>Figure VIII.20.</b> Les composants de la pétrologie du charbon	<b>429</b>
<b>Figure VIII.21.</b> Ce qu'on peut voir à travers de l'analyse d'image et ce qu'on peut (mieux) voir à travers l'analyse pétrographique (Anticipation des résultats)	<b>430</b>
<b>Figure VIII.22.</b> Etapes de préparation des échantillons pour l'analyse en carbone totale	<b>433</b>
<b>Figure VIII.23.</b> Etapes de préparation et d'analyse de la proportion de N et C des échantillons. <b>A.</b> Les capsules de 5 mg sur le plateau à échantillons ; <b>B.</b> Le réacteur d'oxydation ; <b>C.</b> La courbe standard des pics d'azote et carbone à la base du calcul des %N et %C	<b>433</b>
<b>Figure VIII.24.</b> Etapes de la spéciation des formes de charbon: <b>A.</b> Tri granulométrique des échantillons bruts de diamètre <1mm ; <b>B.</b> La séparation par densité -> houille – lignite – autres minéraux ; <b>C.</b> Sur les résidus de houille / four 850°C (calcination) / élimination de la matière volatile, afin de distinguer différents types de houille: Jiu de l'est, Jiu de l'Ouest	<b>436</b>
<b>Figure VIII.25.</b> <b>A.</b> Schéma du mode de génération du signal (rayons X caractéristiques) dans l'analyse FRX (Source : Metallurgist) et <b>B.</b> Description du fonctionnement du tube à rayons X	<b>440</b>
<b>Figure VIII.26.</b> Spectre typique émis par un tube à rayons X en	<b>441</b>
<b>Figure IX.1.</b> Variation de l'épaisseur des couches des deux tranchées	<b>445</b>
<b>Figure IX.2.</b> Les spectres visibles moyens des tranchées $T_{\text{aval}}$ et le $T_{\text{amont}}$	<b>447</b>
<b>Figure IX.3.</b> a. Distribution granulométrique (cumulative et volumétrique) des 11 échantillons de la tranchée aval (valeurs moyennées) ; b. Exemples de diagrammes ternaires des Robinson, Shepard et Folk : b1. – distribution des particules grossières ; b2. – distribution des particules fines	<b>450</b>
<b>Figure IX.4.</b> Variation verticale des diamètres caractéristiques des grains le long de la tranchée $T_{\text{aval}}$	<b>451</b>
<b>Figure IX.5.</b> La variation des valeurs des différents indices des 11 échantillons de la tranchée ( $T_{\text{aval}}$ de Podari)	<b>453</b>
<b>Figure IX.6.</b> Variation de la valeur de $L^*$ le long des tranchées.	<b>453</b>
<b>Figure IX.7.</b> Diagramme de chromaticité et les 11 points correspondant aux couches de la tranchée $T_{\text{aval}}$ de Podari	<b>454</b>
<b>Figure IX.8.</b> Variation de la teneur en lignite et houille dans la tranchée $T_{\text{aval}}$ de Podari	<b>455</b>
<b>Figure IX.9.</b> Relation entre la teneur en charbon et les indices colorimétriques à travers l'analyse en composantes principales pour les 11 échantillons de la tranchée $T_{\text{aval}}$ de Podari	<b>457</b>
<b>Figure IX.10.</b> Variation de la quantité des métaux lourds dans la tranchée $T_{\text{aval}}$ de Podari	<b>457</b>
<b>Figure IX.11.</b> Synthèse des résultats sur les couches sédimentaires au droit de la tranchée $T_{\text{aval}}$ de Podari	<b>458</b>

<b>Figure IX.12.</b> Le mécanisme du phénomène de luminescence. Version adaptée selon Aitken (1985), Timar – Gabor et al. (2013), Duller (2008) et le site internet de la compagnie Landauer	461
<b>Figure IX.13.</b> La représentation schématique de la datation par stimulation stimulée optiquement des sédiments (schéma adapté selon Timar – Gabor <i>et al.</i> , 2013 et Cordier, 2010)	463
<b>Figure IX.14.</b> Matériel de collecte d'échantillons utilisé pour la datation par luminescence des sédiments de la tranchée de Podari	466
<b>Figure IX.15.</b> Schéma et procédure d'échantillonnage	467
<b>Figure IX.16.</b> Exemple de résultat préliminaire d'un cycle SAR d'une aliquote acceptée (P1, 63 – 90 µm) : a – l'évolution du signal OSL; b – L'interpolation de la dose estimée en fonction des doses régénératives ; c – le rapport Tx/Tn le long du cycle SAR	474
<b>Figure IX.17.</b> Les courbes de réponse du signal OSL (naturel et régénératif) de trois aliquotes représentatives des échantillons, P1, P2, P3	475
<b>Figure IX.18.</b> Les courbes de réponse en fonction de la dose régénérative des signaux OSL pour les échantillons P1, P2 et P3. Dans les trois cas, le signal naturel est bien en dessous du niveau de la courbe de saturation. Des aliquotes représentatives des trois échantillons ont été sélectionnées pour la démonstration	476
<b>Figure X.1.</b> La géométrie de la correspondance entre les profils en travers et le site de la tranchée	483
<b>Figure X.2.</b> La courbe de tarage réalisée pour la section de la tranchée Taval et les débits minimaux à atteindre pour déposer chaque couche	485
<b>Figure X.3.</b> Estimation de l'altitude équivalente à la côte « 0 » à l'échelle limnimétrique, pour la section de la tranchée Taval, 295 m en aval de la station hydrométrique de Podari	485
<b>Figure X.4.</b> Le spectre colorimétrique des échantillons de charbon	492
<b>Figure X.5.</b> Boîtes à moustaches de la distribution spectrométrique des quatre échantillons de charbon	493
<b>Figure X.6.</b> Comparaison entre le spectre colorimétrique des échantillons de charbon et de sédiments mélangés	493
<b>Figure X.7.</b> Le modèle idéal de mélange charbon-sédiments basé sur la colorimétrie	495
<b>Figure X.8.</b> Arbres de décision de la classification à 3 catégories : Jiu, affluents et charbon	497
<b>Figure X.9.</b> Arbres de décision de la classification à 4 catégories (les sédiments de la Jiu, les sédiments de la rivière Jilț, les sédiments des autres affluents et le charbon)	498
<b>Figure X.10.</b> Arbres de décision de la première classification à 5 catégories : les sédiments de la rivière Jiu, le lignite, la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents	499
<b>Figure X.11.</b> Arbres de décision de la deuxième classification à 5 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, les sédiments de tous les affluents, le lignite, la houille	500
<b>Figure X.12.</b> Arbres de décision de la classification à 6 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, le lignite, la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents	501
<b>Figure X.13.</b> Arbres de décision de la classification à 7 catégories : les sédiments sur la rivière Jiu dans le secteur extramontan (en aval des gorges), les sédiments de la rivière Jilț, affluents drainant des zones charbonnières (autres que ceux du bassin de la rivière Jilț), les sédiments des autres affluents sans charbon, les sédiments de la tranchée de Podari, les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est	501
<b>Figure X.14.</b> Récapitulation des résultats des 6 classifications avec la méthode CHAID	503
<b>Figure X.15.</b> Résultats de l'analyse d'image pour les sédiments à la tranchée à Podari	504
<b>Figure X.16.</b> Résultats de l'analyse d'image pour les sédiments des rivières en amont de Podari	505
<b>Figure X.17.</b> Exemples de réflectogrammes de la matière carbonneuse des zones de source et de dépôt (Rr (%) - réflectance moyenne, SD - écart type)	508
<b>Figure X.18.</b> Profil vertical des dépôts alluviaux de Podari : <b>a.</b> Corrélogramme entre le lignite, la houille et le charbon altéré dans les analyses pétrographiques / de réflectance ; <b>b.</b> Teneur totale en charbon (%) et Rr moyen (%)	509
<b>Figure X.19.</b> Photomicrographes de microscopie optique. Exemples de macéraux identifiés dans des échantillons de sources (en amont: charbon brut, lit de rivière / environnement) et de dépôts alluviaux (en aval: profil de la rivière Podari). Les microphotographies ont été prises en lumière blanche réfléchie et en mode de fluorescence avec l'objectif d'immersion dans l'huile 50×	510
<b>Figure X.20.</b> Regroupement des points d'échantillonnage en 6 zones reflétant les principales caractéristiques géologiques et l'espèce de charbon	512

<b>Figure X.21.</b> Les quantités de charbon trouvées dans les alluvions prélevées	<b>513</b>
<b>Figure X.22.</b> Variation du contenu en charbon (%) pour chaque couche du dépôt alluvial de Podari (les couleurs des trois zones correspondent à la Figure X.19)	<b>517</b>
<b>Figure X.23.</b> Distributions spatiales des ratios Zr/Si (a), Ti/Fe (b), Ca/Mg (c), P/K (d)	<b>519</b>
<b>Figure X.24.</b> Les cartes des distributions de l'or (a) et de l'uranium (b) dans les sédiments du bassin de la rivière Jiu	<b>520</b>
<b>Figure X.25.</b> La distribution normalisée des lanthanides de la moyenne de chaque lanthanide des échantillons inclus dans les 6 zones sources	<b>521</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Pg</b>
<b>Tableau II.1.</b> Catégories de données nécessaires à l'étude	<b>35</b>
<b>Tableau III.1.</b> Les unités et sous-unités de relief du bassin de la rivière Jiu	<b>55</b>
<b>Tableau III.2.</b> Les stations météorologiques utilisées dans l'analyse climatique du bassin hydrographique de la rivière Jiu et les données caractéristiques (période 1961 – 2013, source : ANM)	<b>65</b>
<b>Tableau III.3.</b> Tendances des températures de l'air moyennes, maximales et minimales multi annuelle, selon le teste de Mann – Kendal (1961 – 2013)	<b>69</b>
<b>Tableau III.4.</b> Données statistiques sur le maximum de précipitations mensuelles (P)	<b>73</b>
<b>Tableau III.5.</b> L'Indice Standardisé des Précipitations (ISP) à l'échelle des saisons pour les stations analysées (période d'analyse 1961 – 2013)	<b>77</b>
<b>Tableau III.6</b> La répartition des secteurs du bassin hydrographique de la rivière Jiu	<b>82</b>
<b>Tableau III.7.</b> Les caractéristiques morphométriques des secteurs de la rivière Jiu en amont des confluences avec les affluents principaux	<b>85</b>
<b>Tableau III.8.</b> Les rivières et bassins affluents d'ordre I de la rivière Jiu ( $L > 30$ km et $F > 100$ km <sup>2</sup> )	<b>89</b>
<b>Tableau III.9.</b> Synthèse des indices hydrographiques pour le bassin de la rivière Jiu et ses affluents	<b>94</b>
<b>Tableau III.10.</b> Les corrections opérées sur la base de données Corine Land Cover 2018	<b>103</b>
<b>Tableau III.11.</b> Localisation des gisements de charbon dans le bassin de la rivière Jiu et leur classification selon différents systèmes	<b>109</b>
<b>Tableau IV.1.</b> Les résultats du test d'autocorrélation de Moran pour les valeurs de TTMD mesurés dans le bassin de la rivière Jiu	<b>127</b>
<b>Tableau IV.2.</b> Matrice de corrélation entre les variables (Pearson (n))	<b>132</b>
<b>Tableau IV.3.</b> Documents cartographiques utilisés pour identifier les processus géomorphologiques	<b>138</b>
<b>Tableau IV.4.</b> Attributs utilisés pour la caractérisation des processus géomorphologiques	<b>142</b>
<b>Tableau IV.5.</b> Classification nominale des interfaces de couplage géomorphologique entre les glissements de terrain et les coulées et le chenal/ lit fluvial	<b>143</b>
<b>Tableau IV.6.</b> Classification nominale de l'impact des glissements de terrain/ coulées sur les chenaux des rivières	<b>144</b>
<b>Tableau IV.7.</b> Inventaire des processus géomorphologiques (nombre) associés aux formations lithologiques d'intérêt dans le bassin de la rivière Jiu	<b>148</b>
<b>Tableau IV.8.</b> Les attributs les plus pertinents des glissements de terrain et les coulées	<b>151</b>
<b>Tableau IV.9.</b> Les paramètres statistiques de base (moyenne, min, max, écart type) des valeurs de connectivité des sous-bassins principaux de la rivière Jiu (valables pour la situation actuelle)	<b>184</b>
<b>Tableau IV.10.</b> Le degré de connectivité des processus géomorphologiques, en fonction de leurs attributs	<b>186</b>
<b>Tableau IV.11.</b> La statistique des pixels RUSLE caractérisés par un degré de connectivité supérieur à la moyenne	<b>191</b>
<b>Tableau V.1.</b> Sommaire des résultats obtenus à la base des tests statistiques d'homogénéité et stationnarité	<b>206</b>
<b>Tableau V.2.</b> Les résultats des tests F et T et des corrélations linéaires entre les débits d'alluvions en suspension (MES) mesurés et estimés aux 22 stations hydrométriques analysées (2001 – 2010)	<b>217</b>
<b>Tableau V.3.</b> Comparaison entre les valeurs des paramètres de statistique de base de MES mesurés et estimés aux 22 stations hydrométriques analysées (2001 – 2010)	<b>218</b>
<b>Tableau V.4.</b> La synthèse des résultats du test de Mann – Kendall et de la pente de Sen pour les stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (les débits moyens annuels)	<b>226</b>
<b>Tableau V.5.</b> La synthèse centralisation des résultats du test Mann – Kendall et de la pente de Sen pour les stations hydrométrique du bassin de la rivière Jiu (débits maximaux annuels)	<b>229</b>
<b>Tableau V.6.</b> Les débits liquides moyens ( $Q_{moy}$ ) et maximaux ( $Q_{max}$ ) multi annuels de la rivière Jiu et leurs coefficients de variation	<b>237</b>

<b>Tableau V.7</b> Caractéristiques des premières 10 crues par ordre de grandeur du débit de pointe aux 12 stations sélectionnées du bassin versant de la rivière Jiu	<b>251</b>
<b>Tableau V.8.</b> Synthèse statistique des plus grandes 10 crues en termes de saisonnalité	<b>252</b>
<b>Tableau V.9.</b> Les caractéristiques des ondes de crues aux stations hydrométriques de la rivière Jiu	<b>255</b>
<b>Tableau V.10.</b> Les caractéristiques des ondes de crues aux stations hydrométriques des affluents de la Jiu	<b>256</b>
<b>Tableau V.11.</b> Les paramètres caractéristiques des débits des alluvions en suspension dans les 22 stations hydrométriques analysées du bassin de la rivière Jiu (période 2001 – 2010)	<b>262</b>
<b>Tableau V.12.</b> Caractéristiques générales des 10 plus grandes crues aux stations hydrométriques de la rivière Jiu dans la période 2001 – 2010	<b>272</b>
<b>Tableau V.13.</b> L'indice d'hystérésis (HI) obtenu pour les 10 plus grandes crues de la période d'analyse 2001 – 2010	<b>278</b>
<b>Tableau V.14.</b> Le type d'hystérésis selon la relation entre les débits solides et liquides des 10 crues étudiées	<b>279</b>
<b>Tableau V.15.</b> Les paramètres utilisés dans l'analyse des relations entre les débits d'alluvions en suspension et les variables de contrôle	<b>285</b>
<b>Tableau V.16.</b> Matrice des coefficients de corrélation de Pearson entre $MES_{moy.multiannuels}$ , $MES_{max.multiannuels}$ et les paramètres morpho-lithologiques (notés dans le tableau ci-dessous Par1 ... Par16)	<b>288</b>
<b>Tableau VI.1.</b> La succession des images aériennes utilisées pour capter l'évolution de la berge à Podari au droit de la tranchée	<b>316</b>
<b>Tableau VII.1.</b> Les débits maximaux de différentes probabilités, estimées avec la loi Pearson III (théorique) et la loi empirique de Weibull	<b>324</b>
<b>Tableau VII.2.</b> Le débit à pleins bords selon le temps de retour	<b>325</b>
<b>Tableau VII.3.</b> Résultats intermédiaires et finaux du calcul du débit à plein bord à Podari, la rivière Jiu	<b>336</b>
<b>Tableau VII.4.</b> Les débits seuils obtenus par les différentes méthodes	<b>341</b>
<b>Tableau VII.5.</b> Les volumes des crues de la rivière Jiu dans la période d'analyse 2002 - 2014, avec débits maximaux supérieurs à 600 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> (station hydrométrique de Podari)	<b>344</b>
<b>Tableau VII.6.</b> Données hydrologiques analysées pour l'année 2007	<b>346</b>
<b>Tableau VII.7.</b> Deux exemples contraires de l'analyse de bilan du flux massique pour les crues de juillet 2005 (avec des MES mesurés) et de novembre 2007 (avec des MES estimés)	<b>352</b>
<b>Tableau VII.8.</b> Les stations et niveaux d'analyse	<b>352</b>
<b>Tableau VII.9.</b> Caractéristiques générales du régime hydrologique des rivières sélectionnées et de la morphométrie de leurs bassins versants	<b>354</b>
<b>Tableau VII.10.</b> Les données dont on dispose pour les rivières Tismana et Amaradia Pietroasa	<b>356</b>
<b>Tableau VII.11.</b> Résumé des indices de crue	<b>364</b>
<b>Tableau VII.12.</b> Synthèse des 27 crues. Caractères, provenances, indices les plus pertinents	<b>388</b>
<b>Tableau VIII.1.</b> Sommaire des campagnes d'échantillonnage	<b>395</b>
<b>Tableau VIII.2.</b> Paramètres d'analyse de l'image à la loupe binoculaire	<b>423</b>
<b>Tableau VIII.3.</b> Pas de travail pour classifier les images des granules de sédiments selon le contenu apparent de charbon, basé sur l'analyse visuelle	<b>425</b>
<b>Tableau IX.1.</b> Les principaux paramètres statistiques concernant la taille des grains pour les 11 couches de la tranchée Taval de Podari	<b>449</b>
<b>Tableau IX.2.</b> Les groupes texturaux auxquels les 11 couches de la tranchée Taval appartiennent	<b>450</b>
<b>Tableau IX.3.</b> La séquence du protocole SAR utilisé pour les aliquotes de la tranchée de Podari	<b>473</b>
<b>Tableau IX.4.</b> Synthèse des données portant sur l'estimation de la dose équivalente (De), des taux du test de déplétion IR, du test de répétition de la dose et du test de récupération du signal	<b>477</b>
<b>Tableau IX.5.</b> Synthèse des données portant sur les contributions au débit de la dose annuelle des échantillons P1, P2 et P3 (fraction 63 – 90 µm), ainsi que les erreurs aléatoires ( $\sigma$ ) et systématiques ( $\sigma_s$ )	<b>478</b>
<b>Tableau X.1.</b> Caractéristiques des crues de la rivière Jiu susceptibles à déborder à Podari	<b>483</b>
<b>Tableau X.2.</b> Les crues qui correspondent au critère de l'altitude minimale pour arriver à la dernière couche déposée	<b>487</b>
<b>Tableau X.3.</b> Caractéristiques des crues susceptibles d'avoir déposé après l'application des deux critères d'analyse	<b>488</b>
<b>Tableau X.4.</b> Scénarios de crues selon le niveau à atteindre et les possibles sources	<b>489</b>
<b>Tableau X.5.</b> Matrice de confusion de l'application des deux modèles de classification à 3 catégories (sédiments de la Jiu, sédiments des affluents et échantillons de charbon)	<b>497</b>
<b>Tableau X.6.</b> Les résultats de la classification avec 4 catégories (les sédiments de la rivière Jiu, le charbon, les sédiments de la rivière Jilț et des échantillons des autres affluents)	<b>498</b>
<b>Tableau X.7.</b> Les résultats de la première classification avec 5 catégories : les sédiments de la rivière Jiu, le lignite; la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents	<b>499</b>



<b>Tableau X.8.</b> Les résultats de la deuxième classification avec 5 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, les sédiments de tous les affluents, le lignite, la houille	<b>500</b>
<b>Tableau X.9.</b> Les résultats de la classification avec 6 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, le lignite, la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents	<b>501</b>
<b>Tableau X.10.</b> Les résultats de la classification avec 7 catégories : les sédiments sur la rivière Jiu dans le secteur extra montan (en aval des gorges), les sédiments de la rivière Jilț, affluents drainant des zones charbonnières (autres que ceux du bassin de la rivière Jilț), les sédiments des autres affluents sans charbon, les sédiments de la tranchée de Podari, les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est	<b>502</b>
<b>Tableau X.11.</b> Récapitulation des résultats des 6 classifications avec la méthode CHAID	<b>503</b>
<b>Tableau X.13.</b> Les statistiques générales des mesures de réflectance sur les échantillons environnementaux	<b>507</b>
<b>Tableau X.14.</b> Les statistiques générales des mesures de réflectance sur les échantillons de charbon	<b>508</b>

## Liste des acronymes et abréviations

ABA Jiu	Administration de la gestion de l'eau du bassin de la rivière Jiu
ACC	L'analyse de correspondance canonique
ACP	L'analyse des composantes principales
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AEE	Agence européenne pour l'environnement
AMIPAHYR	Approches Méthodologiques pour l'analyse de l'Impact des Pressions Anthropiques sur l'état Hydromorphologique des Rivières
ANAR	Administration Nationale Eaux Roumaines
ANCPI	Agence Nationale de Cadastre et Publicité Immobilière
ANM	Administration Nationale de Météorologie
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.I.	Bassin Intermédiaire (§7)
BV	Bassin Versant
C&RT	Classification and regression tree
CA	Côte attention
CE	Conductivity électrique
CEEPUS	Central European Exchange Program for University Studies
Cemagref	Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts
CHAID	Chi-square automatic interaction detection
CI	Côte d'inondation
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CLC	Corine Land Cover
CNLO	Compagnie Nationale du Lignite d'Olténie
CP	Côte de danger / de péril
CWEA	California Water Environment Association
DCE	La directive cadre européenne sur l'eau
DESWAT	Destructive Water Abatement and Control of Water Disasters
DoD	DEM of Difference
DCE	Directive Cadre Européenne de l'Eau
DEM	Digital Elevation Model
DGC	Densité de grains de charbon
DPSIR	Drivers, Pressures, State, Impact and Response model of intervention
DSMW	The Digital Soil Map of the World
EASAC	European Academies' Science Advisory Council
ECA&D	European Climate Assessment & Dataset project
EDF	Électricité de France
EGEA	Association Européenne des Etudiants Géographes
EPA	Environmental Protection Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
ESDAC	European Soil Data Centre
EU-DEM	Digital Elevation Model over Europe
FAO	Food and Agriculture Organisation
GCD	Geomorphic Change Detection
GIEC	Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HUI	Hydrogramme Unitaire
HVC	Système de Notation Munsell
IC	Indice de connectivité
ICCP	International Committee for Coal and Organic Petrology
ICPA	L'Institut national de recherche et de développement en pédologie de Bucarest
IFA	Institut de Physique Atomique
ING	Institut des Géosciences de l'Environnement
IGAR	Institut de Géographie de l'Académie Roumaine

IGE	Institut des Géosciences de l'Environnement
INHGA	Institut National d'Hydrologie et Gestion des Eaux (en Roumanie)
INS	L'Institut National de Statistique de la Roumanie
IPE	L'indice de pluie extrême
ISO	International Organisation for Standardisation
ISCP	L'Institut d'Etudes et de Recherches Pédologiques
ISU	Inspectorat pour les Situations d'Urgence
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KPSS	Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin tests
LCM	Land Change Modeler
LECA	Laboratoire d'Ecologie Alpine
MAAD	Multiple – aliquot additive dose
MARD	Multiple – aliquot regenerative dose
MES	Matières en suspension
MIR	Domaine moyen Infrarouge
MK	Mann-Kendall
MNT	Modèle Numérique du Terrain
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Domaine Proche Infrarouge
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organisation Meteorologique Mondiale
ONEMA	L'Office national de l'eau et des milieux aquatiques
ORRM – PACA	Observatoire Régional des Risques Majeurs en Provence - Alpes - Côte d'Azur
OSL	Optical stimulated luminescence
OSPA	Office d'Etudes Pédologiques et Agrochimiques
PMRI	Plans de Management des Risques d'Inondation
PPPDEI	Plan pour la Prevention, Protection et Diminution des Effets des Inondations
RMSE	Root Mean Square Error
ROCADATA	Romanian Daily Gridded Climatic Dataset
ROI	Region of Interest (en analyse d'image)
ROMSEM	Romanian Soil Erosion equation
RUSLE	Revised soil erosion equation
SAWIS	<u>Scientific Association for Water Information System</u>
SAR	Unique – aliquot regenerative protocole
SDGE	Schéma Directeur de la Gestion de l'Eau
SDR	Sediment Delivery Ratio
s.h.	Station hydrométrique
SIG	Système d'Information Géographique
s.m.	Station météorologique
SREM	Secteur des Ressources Energétiques Minérales
SRTS	<u>Système Roumaine de Taxonomie des Sols</u>
SNHT	Standard Normal Homogeneity Test
SRTS	Le Système roumain de taxonomie des sols
TDS	Total dissolved solids
TTC	La Teneur Totale en Carbone
TTMD	Teneur Totale en Matières Dissoutes
UCM	Unité de cartographie minimale
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation
USDA	Département de l'Agriculture des États-Unis
USGS	United States Geological Survey
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
USPED	Unit Stream Power – based Erosion Deposition
Vf.	(rou. Vârf), <i>syn.fr</i> - Sommet
VIS	Visible Imaging Spectrometer
XRF	<u>X-Ray Fluorescence</u>

## Liste des notations et symboles

Notation/ Symbole	Unité de mesure	Signification
$\rho$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Densité d'un liquide
d	$\mu\text{m}/\text{cm}/\text{mm}$	Diamètre caractéristique du sédiment
q	$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$	Débit liquide spécifique
$I_{\text{moy}}$	‰	Pente moyenne du bassin/ de la rivière
$\sigma$		Déviatoin standard de la série
P	mm	Précipitation
D	km	Distance entre les sources de la rivière Jiu et la confluence avec l'affluent en cause
$D_d$	$\text{km}/\text{km}^2$	La densité du drainage / du réseau hydrographique
S	$\text{km}^2$	La superficie du bassin
$H_{\text{moy.bassin}}$	m	L'altitude du bassin versant
L	km	Longueur de la rivière
$L_b$	km	Longueur du bassin
$P_b$	km	Périmètre du bassin
$K_s$	%	Coefficient de sinuosité
F	$\text{km}^2$	Superficie du bassin versant
$H_{\text{moy}}$	m	Altitude moyenne du bassin versant
$P_{\text{moy}}$	%	Pente moyenne du bassin versant
$K_f$	%	Coefficient de boisement
$F_r$		Facteur de forme
$R_c$	%	Rapport de circularité
$R_e$	%	Rapport d'élongation
P	km	Périmètre du bassin versant
W		Facteur de pondération (impédance par rapport à l'écoulement et au transfert des sédiments)
RI	%	Indice de rugosité
IC		Indice de connectivité
$\rho$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$	La concentration des alluvions en suspension
M	g	Poids des matières en suspension
$\rho$	$\text{g}\cdot\text{m}^3$	la turbidité moyenne annuelle
T	h ou sec	le temps
A	ha	la surface du bassin versant
$S_{Yr}$	$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	Débit solide pondéré par la superficie
$Q_{\text{max}}$	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Le débit de pointe
$T_c$	h	La durée de croissance de la crue
$T_d$	h	La durée de décroissance de la crue
$T_t$	h	La durée totale de la crue
W	mil. $\text{m}^3$	Le volume d'eau d'une rivière
$H_s$	mm	La lame d'eau ruisselée pendant la crue
$\gamma$		Le coefficient de forme de la crue
$R_{\text{moy}}$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Le débit moyen des alluvions en suspension multiannuel
$R_{\text{max}}$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Le débit maximal des alluvions en suspension
MES	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	La concentration des alluvions en suspension
$W_{\text{an}}$	Mil. tonnes	Le volume annuel de matières solides
r	$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	Le débit moyen spécifique des alluvions en suspension
Q	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Le débit liquide moyen d'une rivière dans la section considérée
$Q_{\text{moyen.journalier}}$	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Le débit moyen journalier
$V_{\text{moy.eau}}$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	La vitesse moyenne de l'eau
$Q_{\text{méd}}$	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Le débit médian d'une crue
$HI_{\text{méd}}$		L'indice d'hystérésis pour le débit médian

$MES_{mont}$	$g \cdot l^{-1}$	La concentration des alluvions en suspension pour la rame montante de la crue
$MES_{mont}$	$g \cdot l^{-1}$	La concentration des alluvions en suspension pour la rame descendante de la crue
$T_{retour}$	ans	Temps de retour d'une crue
R	m	Le rayon hydraulique
A	$m^2$	La superficie de la section mouillée
P	m	Le périmètre de la section mouillée
S	‰	La pente de la ligne d'eau
n		Le coefficient de rugosité calculée selon la formule de Strickler
I1		Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence
I2		Contribution en volume relatif au volume total amont
I3	mm	Lame d'eau totale ruisselée
I4	%	Contribution en volume relatif au volume total amont pondérée par la superficie du bassin versant
I5		Volume de la crue/ volume annuel de la même station
I6		Volume de la crue/ volume pluri - annuel de la même station
I7		Volume de la crue/ volume des crues de la même station dans la période analysée
I8		Coefficient de ruissellement
I9	%	Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence
I10	%	Contribution en volume relatif au volume total amont
I11	mm	Lame d'eau totale ruisselée
I12		Volume de la crue/ volume annuel de la même station
I13		Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)
$M_{fr}$	g	La masse du sédiment pour un certain intervalle granulométrique
$M_{total}$		La masse totale de l'échantillon
$D_{50}$	$\mu m$ , mm ou cm	Le diamètre médian
$x(\lambda)$ , $y(\lambda)$ , $z(\lambda)$		Fonctions de correspondance des couleurs pour CIE 2° Standard Observer
$R_r$	%	La réflectance spectrale de l'échantillon
Ka	ka	L'âge exprimé en milliers d'années
Gy	j/kg	L'unité de la dose ou la paléodose
$D_a$	Gy/ka	La dose annuelle de radioisotopes

## Grille de lecture

La thèse de doctorat a été élaborée en cotutelle internationale entre l'Université de Bucarest/ la Faculté de Géographie/ l'Ecole doctorale "*Simion Mehedinti – Nature et Développement Durable*" et l'Université de Grenoble Alpes/ l'Institut des Géosciences de l'Environnement/ l'Ecole doctorale "*Terre, Univers, Environnement*". Afin de comprendre la manière dont la recherche a été conçue et, bien entendu, comment les résultats ont été obtenus et reproduits, il convient de noter que la proposition du projet appartient à la partie roumaine, pour les raisons indiquées au §1.2. La doctorante a bénéficié d'une bourse du gouvernement français obtenue par concours, sur une durée de 12 mois (repartis sur 3 années) pour les besoins de vie à Grenoble. Pour le travail en laboratoire et pour le reste des stages à Grenoble, d'autres suppléments financiers se sont ajoutés (projet AMIPAHYR, soutien LABEX de laboratoire, des bourses de CEEPUS ou allocations doctorales des deux universités pour participer à des conférences ou des stages de laboratoire en Roumanie, en France ou autres pays). Cette combinaison de sources de financement et de contributions au déroulement de la thèse reflétera peut-être le style d'écriture et les liens créés entre certaines méthodes et résultats appartenant à différentes entités collaboratives. Nous espérons ne pas écraser la lecture, mais au contraire, donner du sens au fil logique de la recherche avec ces particularités.

Ce manuscrit a une structure d'une thèse de doctorat classique et non d'un article scientifique. Après une revue de la littérature sur le sujet et son articulation avec le titre choisi, sur la base d'une question générale au début, la recherche commence à contribuer à la connaissance de la zone d'étude et son fonctionnement hydrosédimentaire, puis la question devient plus précise, se concentrant sur l'approche méthodologique. Ainsi, la logique de la thèse suit effectivement la structure d'emboîtement des échelles spatio-temporelles, de la partie générale à la partie plus spécifique / localisée.

Au début des chapitres, nous avons dressé un état d'art sur la problématique en cause. Dans le texte, les informations entre parenthèses correspondent aux éléments supplémentaires sur les travaux cités, sur une certaine méthode ou sur l'explication d'un terme utilisé. Puisque nous considérons la thèse de doctorat comme un ensemble de méthodes et de techniques adoptées et/ou adaptées aux objectives autant que possible dans la limite des données mises à notre disposition, du temps et de notre expertise, les concepts et les idées seront plusieurs fois illustrés par des figures et des schémas. Toujours, une attention particulière sera portée vers les protocoles de travail, assez nouveaux dans le domaine de la géographie. Les noms mentionnés entre crochets « [...] » renvoient aux références bibliographiques.

Le lecteur sera parfois confronté à des questions et à des raisonnements élaborés pour répondre à ces questions, mais les liens avec les connaissances acquises au cours des chapitres et approches précédents seront précisés à chaque étape. Pour faciliter les différents niveaux de lecture, on trouvera à la fin de certains chapitres une synthèse.

Enfin et surtout, une table de matières plus détaillée apparaîtra à chaque début de chapitre afin de guider la lecture locale et alléger le contenu présenté au début de la thèse.

*Agréable découverte !*

# Première Partie

## *L'échelle du bassin de la rivière Jiu: les facteurs contrôlant la dynamique hydro-sédimentaire*



### Chapitre 1.

### Introduction

1.1. Contexte de la recherche.....	2
1.2. Motivation du choix du bassin de la rivière Jiu.....	5
1.3. Questions de la recherche et objectifs.....	6
1.4. Organisation de la thèse.....	7

## 1.1. Contexte de la recherche

Le bassin hydrographique est l'unité spatiale naturelle fondamentale pour la formation des ressources en eau et leur gestion. Il correspond à la zone « *dans laquelle toutes les eaux de ruissellement convergent à travers un réseau de rivières, fleuves et éventuellement de lacs vers la mer, dans laquelle elles se déversent par une seule embouchure, estuaire ou delta* » [CE/60/2000]. Le bassin hydrographique est aussi défini comme une superficie terrestre qui achemine l'eau des précipitations et de la fonte des neiges vers les ruisseaux, les rivières, et finalement vers des points d'embouchure tels que les réservoirs, les lacs, les baies et l'océan [NOAA, 2018].

Le bassin hydrographique est un espace dynamique par excellence, où toutes les lois et relations de causalité entre processus et flux hydro-sédimentaire ont lieu à l'intérieur de ses frontières, sans avoir à les transcender. Il est l'espace où les relations de type *réservoirs – rivières* ou *têtes de bassins en amont – plaines alluviales en aval* sont essentiellement liées à la gestion des ressources en eau et dont les changements se font sentir au niveau de l'ensemble du bassin hydrographique [ONEMA, 2012]. L'intérêt d'étudier un bassin hydrographique découle des relations entre les facteurs géographiques afin d'utiliser au mieux les rivières et les territoires [Greco, 1992].

Selon [International Rivers](#)<sup>1</sup>, tous les territoires et toutes les communautés appartiennent à un bassin hydrographique, ce qui nous conduit aux constats suivants :

- **Nous sommes tous reliés par des bassins versants, les entités naturelles les plus complexes ne respectant pas les frontières administratives, mais d'autres types de frontières imposées par la ligne de partage d'eau.** *Au contraire, tout ce que nous faisons affecte nos bassins versants et chaque réglementation territoriale, décision de gestion, devrait d'abord porter sur les impacts au sein d'un bassin hydrographique.*

- **Nous vivons tous en aval de quelque chose et en amont de quelque chose d'autre.** *Si un transfert de notion nous est autorisé, c'est un axiome dont nous avons rarement connaissance et qui cache de nombreuses réponses aux questions découlant des problèmes de gestion de l'eau et des sédiments.*

- **La terre et l'eau sont écologiquement liés dans ce système naturel et tous les flux et processus qui s'y déroulent leur appartiennent. Cela concerne non seulement les connexions spatiales, mais aussi les dépendances temporelles.** *La veine d'eau qui se trouve maintenant en aval est ressortie autrefois d'une source en amont et un grain de sable que l'on trouve maintenant dans le lit de la rivière s'est détaché autrefois du versant.*

Afin de nous rapprocher davantage du sujet central de ce travail de thèse, il est primordial de définir et d'expliquer les concepts clés que nous allons utiliser. A part la notion de bassin hydrographique, un autre concept qui s'apparente est le **système hydrographique**, qu'on va regarder sous différents angles : **(i)** de la *géographie physique*, pour définir toutes ses caractéristiques naturels et anthropiques ; **(ii)** de l'*hydrologie*, pour quantifier et analyser la variabilité des flux de matière ; et **(iii)** de l'*hydromorphologie*, une discipline située à la jonction de la géographie physique, de l'hydrologie, de la géologie et de la sédimentologie, qui offre de multiples ouvertures pour la connaissance de la capacité de transport fluvial,

---

<sup>1</sup> [Vers le lien de l'International Rivers](#)



ainsi que pour l'évaluation du potentiel dynamique d'un bassin hydrographique [Chapuis, 2012; Malavoi et Bravard, 2014].

L'étude d'un système fluvial du point de vue de l'hydromorphologie, une discipline placée au carrefour de la géographie physique, l'hydraulique, la géologie et la science des sédiments, offre des nombreuses ouvertures vers la compréhension de la capacité de transport d'une rivière, ainsi que sur l'évaluation du potentiel dynamique d'un bassin versant [Chapuis, 2012; Malavoi et Bravard, 2010]. Au sein de ce système hydrographique nous pouvons repérer le **fonctionnement hydrodynamique** à travers lequel les cours d'eau tendent à équilibrer les facteurs de contrôle agissant sur les flux liquides et solides [Jégou et Belleudy, 2002; Uwe, 2012]. Ces facteurs peuvent être bien étudiés dans les petits ou moyens bassins versants, selon le concept de « budget sédimentaire » [Dietrich *et al.*, 1978]. Par conséquent, la variabilité de ces flux, ainsi que la dynamique hydromorphologique sont étroitement liées aux facteurs d'influence environnementaux et anthropiques [Kondolf et Piégay, 2003]. Sous l'effet du changement climatique, des modifications du régime hydrologique ont déjà été observées ou sont prévues pour l'avenir, ce qui génère des impacts sociétaux et environnementaux considérables [GIEC (IPCC), 2013]. Pour cette raison, l'un des défis de la société contemporaine est d'identifier et d'estimer les changements dans la variabilité des flux hydro-sédimentaires afin de réduire leurs impacts pour une gestion adéquate des eaux et des bassins versants. Le cadre législatif portant sur la gestion de l'eau à l'échelle européenne est fourni par la Directive Eau [CE/60/2000] et la Directive Inondations [CE/60/2007]. Les règlements visant la gestion des bassins versants qui en découlent ont été transposées en Roumanie à travers les *Schémas Directeurs et de Gestion des Eaux des bassins versants* (les SDGEs), ayant comme objectifs majeurs la gestion des ressources hydrologiques et l'amélioration de la qualité des milieux aquatiques, touchées de nos jours par une influence climatique et anthropique accrue [ANAR, 2012].

Une autre notion liée au bassin hydrographique et au fonctionnement hydrodynamique est la **dynamique hydro-sédimentaire**. Celle-ci implique la connaissance de tous les éléments intervenant dans la circulation des matières liquides (eaux de rivières et torrents) et solides (sédiments et particules polluantes).

Le rôle du bassin hydrographique dans la dynamique hydro-sédimentaire a été souligné à de nombreuses reprises, à la fois dans les études scientifiques, dans le contexte de l'aménagement du territoire et pour la gestion de l'envasement des ouvrages hydro-électriques [Fasolato *et al.*, 2006 ; Germain, 2013]. Le bassin hydrographique est toujours un „champ de combat” entre les processus et les phénomènes naturels, d'un côté, et des forçages anthropiques qui sous-tendent de leurs points de basculement, de l'autre côté : les changements environnementaux dus à la dynamique de l'occupation du sol, des aménagements engendrant la perturbation des flux hydro-sédimentaires des écosystèmes aquatiques avec des effets sur la société [Fiandino et Rotidis, 1996]. Toutes ces interférences entre l'environnement naturel et anthropique d'un système hydro-sédimentaire sont impactées par certaines transformations morfo-hydrographiques résultant de l'érosion, de processus de transport et d'accumulation ayant des conséquences irréversibles sur les rivières: incision des lits, apparition de zones de stockage, voire captures de sédiments, impacts sur les activités torrentielles résultant de l'aménagement défectueux des versants [Peiry, 1990; Bravard, 1994; Gautier, 1004].

Pour toutes ces raisons, la connaissance de la dynamique hydro-sédimentaire d'un bassin versant, considéré comme la plus complexe et complète entité naturelle, au sein de laquelle se manifestent tous les principes et les lois opérés par les sciences de la terre, est au cœur de l'activité de gestion des bassins versant transposant les directives de l'UE dans le domaine de l'eau et de l'environnement.

Comme nous venons de le constater, il existe plusieurs raisons qui nous incitent à étudier la dynamique hydro-sédimentaire d'un bassin hydrographique et qui nous ont déterminé à choisir un tel sujet de recherche pour la présente thèse de doctorat. En effet, dans chacun de ces cas d'exploitation ou d'aménagement des bassins versants, les modifications physiques amenées par les activités anthropiques s'expriment par un fonctionnement différent des processus de transport solide.

\*\*\*

Dans le cadre du fonctionnement hydro-sédimentaire, il est nécessaire de considérer de façon adéquate l'échelle d'étude. De nombreux auteurs ont souligné l'importance de considérer une échelle de travail convenable à la question de recherche dans un système hydrographique et ils ont également montré la coexistence des différentes échelles d'analyse du transport hydro-sédimentaire et de la morphologie qui en résulte [Snelder et Biggs, 2002; Kondolf et Piégay, 2006; Coleman et Smart, 2011; Molnar, 2017].

Certes, la dynamique hydro-sédimentaire dans un bassin hydrographique ne peut se dérouler à une seule échelle spatio-temporelle. Ainsi, autant que nous voudrions réduire un événement hydrologique ou un processus d'érosion des versants ayant comme conséquence l'alimentation du lit de sédiments à un moment donné ou à un petit espace isolé, nous risquons toujours d'éliminer l'essence de la complexité multidimensionnelle de la dynamique hydro-sédimentaire dans un bassin hydrographique. Sans trop insister sur les types d'échelles utilisées dans une telle approche, nous précisons simplement qu'il est plus raisonnable de les considérer du sens général au particulier (notion bien connue comme « top-down approach »), mais sans nécessairement passer par tous les échelles intermédiaires. Nous expliquerons cette stratégie plus en détail dans le chapitre 2, où nous présenterons les échelles temporelles et spatiales les plus appropriées aux objectifs de notre étude.

Par ailleurs, le choix de remplacer une vision systémique par une approche focalisée à une échelle spatiale détaillée risque de faire perdre de vue des détails que nous pouvons obtenir des recherches effectuées sur le terrain et en laboratoire, mais qui ne tiennent pas nécessairement d'une échelle ou autre. De la sorte, le titre de la thèse ne doit pas laisser comprendre que nous analyserons la dynamique hydro-sédimentaire à partir de toutes les échelles spatio-temporelles possibles, mais que cette vision systémique nous aidera à identifier les échelles spatio-temporelles les plus appropriées pour répondre de façon fiable aux questions de la thèse. Cette philosophie consistant à analyser le cadre conceptuel général et à détailler sur plusieurs échelles spatiales et de temps s'avérera être la plus pragmatique, bien que peut-être pour ceux qui sont habitués à la recherche quantitative, cette approche paraisse légère et incomplète.

Partant des prémisses créées par le cadre de recherche, le choix d'analyser « *la dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu par une approche systémique et multi-échelle* » prouve son intérêt scientifique de plusieurs points de vue :

- L'amélioration des connaissances sur le régime hydrologique des flux liquides et solides en relation avec les variables environnementales et les activités anthropiques ;

- L'analyse des flux hydro-sédimentaires en considérant plusieurs échelles spatiales (à la fois systémique et au niveau certains secteurs de la rivière Jiu, de ses sous-bassins versants, jusqu'à l'échelle des sites de dépôt sédimentaires) et temporelles (de jours à des dizaines d'années) ;
- La création d'un contexte informationnel scientifique approprié à la mise en œuvre des actions potentielles pour gérer la dynamique hydro-sédimentaire des rivières et les risques hydrologiques associés dans le bassin de la rivière Jiu.

La zone d'étude bénéficiera d'une recherche complexe, interdisciplinaire, basée sur la théorie de l'hydrosystème [Schumm, 1977; Ngounou-Ngatcha *et al.*, 2010], pour analyser l'ensemble des processus liées à la dynamique des flux liquides et solides, afin de les gérer dans une manière adéquate. Ainsi, l'originalité de la recherche réside de l'approche interdisciplinaire des transferts hydro-sédimentaires au sein du système hydrographique du bassin de la rivière Jiu. Le travail s'appuie sur des méthodes spécifiques à la géographie, mais également à d'autres domaines : hydrologie, géomorphologie fluviale et géochimie. Les différentes méthodes explorées s'articulent bien avec le thème de la présente thèse et surtout, elles font preuve de la complexité du problème pour aborder, au moins partialement, la perspective systémique et multi-échelle de la dynamique hydro-sédimentaire.

## ***1.2. Motivation du choix du bassin de la rivière Jiu***

Pour analyser la dynamique hydro-sédimentaire, nous avons choisi le bassin versant de la rivière Jiu, un affluent du premier ordre du Danube, non seulement pour sa complexité géographique et hydrologique, mais aussi pour d'autres raisons que nous verrons plus loin et qui permettent d'approfondir le thème de recherche choisi.

Le bassin de la rivière Jiu est situé dans le sud-ouest de la Roumanie et il s'étale sur une superficie de 10080 km<sup>2</sup>, avec des altitudes qui descendent du nord au sud graduellement de 2519 m à 50 m à la confluence avec le Danube, à travers : les Carpates méridionales (le secteur supérieur), les Sous-Carpates et le Piedmont Gétique (le secteur moyen) et la Plaine Roumaine (le secteur inférieur). Le bassin versant de la rivière Jiu a comme particularité importante la présence de mines de charbon (houille dans le secteur supérieur - dans la dépression de Petroșani et lignite dans le secteur moyen, dans le bassin de Motru-Rovinari) qui ont laissé des traces de charbon dans les dépôts alluviaux de la rivière Jiu et de ses affluents. Les activités minières ont généré un développement rapide de l'industrie (particulièrement dans la dépression de Petroșani), ayant comme effet une forte pollution des eaux de la rivière Jiu et de ses affluents. Dans les décennies du « boom » industriel en Roumanie (la période des années '60 et '90), la dynamique hydro-sédimentaire de la rivière Jiu était un sujet presque tabou en raison de l'effet polluant du lavage du charbon dans les villes de la dépression de Petroșani. A cause des activités minières, la Jiu a été, pendant des décennies, une des rivières les plus turbides du pays [Ionică *et al.*, 2002]. A l'époque, la rivière Jiu était connue comme **l'affluent noir du Danube** et l'origine des hauts flux solides, même si très peu étudiés, n'était pas questionnable : l'activité d'extraction et du lavage du charbon.

A partir de 1990, après la chute du communisme, une série de carrières et mines ont été fermées ou ont réduit leurs activités, tandis que d'autres ont repris leurs licences d'exploitation du charbon [Nistor, 2002]. Dans les deux cas, les activités humaines dans le bassin supérieur du Jiu ont déterminé, au fur et à

mesure, des modifications dans la qualité des eaux des rivières et dans leur régime hydromorphologique [Ionică *et al.*, 2002; Ionuș, 2011].

La gestion fluctuante des activités minières depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, à laquelle nous pouvons ajouter les travaux hydrotechniques et la construction de barrages – réservoirs à des fins au cours des 50 dernières années, ont largement été rapportés comme génératrices des impacts significatifs sur le fonctionnement hydro-dynamique des rivières [Savin, 2003; Savin 2005; Uscătescu, 2013; Rădoane, 2017]. De plus, après 1990 avec les changements dans le régime de la propriété en Roumanie, des importantes parcelles forestières ont été défrichées, déstabilisant les versants et impactant ainsi les flux liquide et solide des rivières. Toutes ces activités et aménagements des rivières sont responsables pour l'altération du débit liquide et solide et du taux d'érosion, transport et accumulation dans les lits [Horvath, 2008; Uscătescu, 2013], ainsi que pour l'interruption des connexions longitudinales avec le système hydromorphologique [Rădoane et Rădoane, 2007 ; Horvath, 2008].

Les rares glissements de terrain provoqués par l'instabilité des tas de stériles lors des pluies torrentielles, ainsi que le ruissellement sur leur surface à l'origine des quantités importantes de fines particules de charbon transportées en suspension et déposées sur les barres alluvionnaires. A l'opposée, il convient également de mentionner la diminution du transport solide des rivières en aval, à cause des retenues dans le secteur moyen (entre Bumbesti Jiu et Ișalnița) et plus récemment, dans le secteur supérieur des Gorges de la Jiu, où une chaîne d'ouvrages hydroélectriques est en construction, dont les effets sont à venir.

L'existence et l'exploitation du charbon dans des zones clés de source des sédiments (les carrières et mines des bassins de Motru-Rovinari et Petroșani), confèrent un caractère original à la recherche de la dynamique hydro-sédimentaire, ce qui nous ont permis d'étudier les transferts de matière dans le bassin versant de la rivière Jiu en Roumanie. Il reste à notre esprit critique et à la pertinence de certaines analyses des domaines connexes d'apprécier dans quelle mesure le charbon peut être utilisé comme traceur dans les études portant sur les flux hydro-sédimentaires.

Tous ces enjeux anthropiques impactant les processus hydro-sédimentaires sont à débattre dans les chapitres suivants.

### ***1.3. Questions de la recherche et objectifs***

Le sujet de la thèse de doctorat a un caractère interdisciplinaire, réunissant des aspects spécifiques à plusieurs domaines (géographie, hydrologie, géochimie, géomorphologie fluviale). En conséquence, on trouve les principales questions de notre analyse de la dynamique hydro-sédimentaire à la croisée de ces domaines :

- ❖ ***Quels sont les facteurs naturels et anthropiques contribuant à la production et au transfert des flux de matière liquide et solide au niveau du bassin de la rivière Jiu et quel est leur rôle dans la dynamique hydro-sédimentaire ?***
- ❖ ***Quelle est l'importance des échelles spatiales et temporelles dans l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire en ce qui concerne les sources de sédiments, les événements hydrologiques extrêmes, les voies de transfert et les zones favorables à l'accumulation ?***

Ces questions nous conduisent vers notre objectif principal qui est d'analyser **les flux hydro-sédimentaires dans le bassin versant de la rivière Jiu, dans les circonstances (naturelles et anthropiques) spécifiques à ce bassin, à des différentes échelles spatiales et temporelles**. Un regard particulier s'oriente vers la relation entre les zones de production et celles de transport et d'accumulation des sédiments, en fonction du rôle joué par les variables de contrôle dans la dynamique fluviale. Compte tenu des attributs du bassin de la rivière Jiu, nous avons choisi d'identifier plus particulièrement les zones de productivité sédimentaire, les processus et leur temps caractéristique de transfert.

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous avons essayé de valoriser la présence du charbon dans les sédiments du lit et des berges des rivières pour étudier la dynamique des flux hydro-sédimentaires. Dans ce contexte, la présente thèse cherche à tirer parti de cette particularité et comporte une question méthodologique préalable : **Est-ce que les héritages sédimentaires dans le lit représentent un instrument suffisant pour comprendre la migration des flux de matière dans le bassin versant et le rôle des crues dans la morphologie fluviale ?**

Ce sujet aurait pu être traité de manière plus ou moins exhaustive, mais nous avons été contraints par les ensembles incomplets de jeux de données hydrologiques et topographiques disponibles et par le coût élevé des certaines méthodes. Par conséquent, nous avons choisi, volontairement, des moyens plus économiques pour notre étude.

Nous avons essayé de répondre aux questions de la thèse en définissant les objectifs spécifiques majeurs suivants:

**1) Analyser les facteurs de contrôle et les catégories d'altérations sur les processus impliqués dans le transport sédimentaire.** Ce premier objectif correspond à une analyse complexe que l'on souhaite mener, d'une part, pour connaître du point de vue géographique, géomorphologique et hydrologiques le bassin de la rivière Jiu, et, d'autre part, pour analyser les facteurs naturels et anthropiques liés à la dynamique hydro-sédimentaire.

**2) Développer une méthodologie combinée (modèles conceptuels et traçage géochimique) pour déterminer la dynamique hydro-sédimentaire et la durée de réponse du système hydromorphologique du bassin de la rivière Jiu.** Ce deuxième objectif se circonscrit à une recherche approfondie de méthodes et de techniques adaptées aux particularités physico-géographiques et anthropiques du bassin de la rivière Jiu, qui doit être testée et explorée pour une connaissance plus détaillée de la dynamique hydro-sédimentaire à différentes échelles d'analyse.

## **1.4. Organisation de la thèse**

La thèse est structurée en deux parties qui suivent de près l'évolution et le devenir de l'approche méthodologique adaptée aux objectifs fixés. Chaque partie essaye de répondre à une question globale, de façon à justifier les méthodologies qui suivent la démarche.

**La première partie** est subordonnée au premier objectif indiqué ci-dessus et apporte des réponses à la question majeure suivante : **quels sont les particularités des facteurs potentiels qui influent la production et le transfert des flux liquides et solides dans le bassin de la rivière Jiu ?**

Cette partie porte alors, en précisant au cours de 5 chapitres les particularités géographiques, géomorphologiques et hydrologiques du bassin de la rivière Jiu.

*Le chapitre 1* établit le contexte général du thème de recherche, apporte des arguments sur le choix de la zone d'étude et du sujet de recherche et oriente le développement des démarches suivantes.

*Le chapitre 2* dresse un état de l'art sur la problématique de la dynamique hydro-sédimentaire, les enjeux, limites et avantages de l'approche systémique et multi-échelle, ainsi que les processus et facteurs de contrôle de la production et du transfert des flux liquides et solides dans un bassin versant.

*Le chapitre 3* décrit le bassin versant de la rivière Jiu en illustrant les principales caractéristiques physiographiques et anthropiques marquantes pour la trajectoire des flux hydro-sédimentaires faisant l'objet de ce travail.

*Le chapitre 4*, en s'appuyant sur les outils SIG, propose une série de méthodologies destinées à mettre en relation les facteurs géographiques et le potentiel géomorphologique (en termes de sources et processus de versant) pour la production, le transfert et le stockage des sédiments sous ses différentes formes. Sans distinguer pour l'instant les modes de transport et les types de sédiments, les méthodes que nous allons déployer sont aussi bien applicables aux sédiments très fins, y compris la matière dissoute, qu'aux sédiments plus grossiers. Enfin, la synergie entre la connectivité géomorphologique potentielle et le transfert des sédiments dans le bassin de la rivière Jiu seront évalués en prenant en compte la connectivité potentielle prouvant les liens topographiques et géomorphologiques entre les sources de sédiments et les zones de couplage/ découplage sédimentaire.

*Le chapitre 5* porte sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la rivière Jiu, en mettant l'accent sur la variabilité spatio-temporelle des débits liquides et solides et la relation avec les différents paramètres morphométriques, hydrologiques, climatiques et de nature anthropique.

Dans **la deuxième partie** de la thèse, on change d'échelle d'analyse, tant temporelle que spatiale, pour étudier la dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu. Cette partie est ainsi subordonnée au deuxième objectif de la thèse. Le fil rouge du travail dans cette seconde partie sera toujours relié à la question suivante : *quels sont les moments et les zones favorisant le transfert hydro-sédimentaire ?*

Dans ce contexte, *le chapitre 6* établit lesquels des concepts d'hydrologie sont mieux adaptés pour comprendre autant que possible la dynamique hydro-sédimentaire dans une zone d'étude des dimensions et de la complexité du bassin de la rivière Jiu, en précisant tout d'abord le type de transport sédimentaire dont on peut s'occuper dans le contexte des jeux de données disponibles. Ensuite, une échelle de temps considérée adéquate est choisie pour étudier les effets de la dynamique hydro-sédimentaire, tant au niveau spatial que temporel, pour enfin proposer une méthodologie pour quantifier ces apports hydro-sédimentaires.

*Le chapitre 7* traite la dynamique hydro-sédimentaire à l'échelle des crues, événements hydrologiques avec une influence majeure sur le transfert de sédiments. Les méthodes de sélection des crues sont présentées et des indicateurs hydrologiques sont proposés pour identifier les bassins versants responsables de la formation des crues et du transfert de la matière sédimentaire dans les secteurs en aval.

*Le chapitre 8* détaille le protocole d'échantillonnage et de laboratoire en ce qui concerne les types de dépôt alluvionnaires analysés (sédiments du pavage des lits des rivières et sédiments de la berge de la rivière Jiu). Afin de caractériser les alluvions en termes de composition, aspect, sources de provenance et moments de dépôt, plusieurs méthodes ont été essayées. Ainsi, ce chapitre marque le début de la partie expérimentale de la thèse, basée non plus sur les jeux de données spatio-temporelles traditionnellement



utilisées en géographie et hydrologie, mais sur des données obtenues par moyens propres : les échantillons de sédiments collectés des lits fluviaux et du charbon des bassins d'extraction.

*Le chapitre 9* est dédié à la validation de la stratigraphie d'un dépôt alluvial du secteur inférieur de la rivière Jiu, qui constitue le site principal d'étude. La succession stratigraphique est analysée à la fois de haut en bas (pour confirmer la sélection des couches des alluvions) et de bas en haut (pour dater la première couche déposée).

Enfin, *le chapitre 10* vise à intégrer et synthétiser les informations obtenues à partir des deux approches des chapitres précédents : hydrologique et le binôme terrain - laboratoire. La méthodologie vise à déterminer : *(i)* les moments / les épisodes de crue auxquels les transferts de sédiments les plus importants ont eu lieu, à partir des conséquences sur les accumulations en aval ; et *(ii)* les sources potentielles de cette dynamique hydro-sédimentaire (tant ponctuelles, comme par exemple des activités industrielles, que surtout concernant les sous-bassins hydrographiques ou leurs secteurs).

*Les conclusions* portent sur les réponses aux questions de la recherche menée dans le cadre de cette thèse, en synthétisant les résultats de la démarche méthodologique. Les perspectives possibles sont également présentées.

## Chapitre 2.

### Aspects conceptuels et méthodologiques : système fluvial, échelles spatiales et temporelles, connectivité

<b>2.1. Approche systémique</b> .....	11
2.1.1. Le système fluvial : quelles perspectives ?.....	11
2.1.2. Le concept d' "Hydrosystème" .....	17
2.1.3. Le système total vs. le système partiel.....	20
<b>2.2. Approche multi-échelle</b> .....	21
2.2.1. L'échelle spatiale.....	23
2.2.1.1. La micro - échelle d'un système fluvial.....	24
2.2.1.2. La méso - et la macro-échelle spatiale.....	26
2.2.2. L'échelle temporelle.....	27
2.2.2.1. L'échelle du temps : des années aux décennies.....	27
2.2.2.2. L'archéologie fluviale à travers les échelles : des jours aux siècles.....	28
<b>2.3. La connectivité dans un système fluvial : une notion qui lie tout ?</b> .....	29
<b>2.4. Méthodologie et données</b> .....	31
2.4.1. Méthodes et outils utilisés dans l'étude des systèmes fluviaux et de la dynamique hydro-sédimentaire.....	31
2.4.2. Données.....	34



## 2.1. Approche systémique

### 2.1.1. Le système fluvial : quelles perspectives ?

Comme Knighton l'a souligné en 1984, le domaine de la géomorphologie fluviale a développé un nombre assez réduit de théories et concepts originaux, ayant plutôt la tendance de les importer de la part des domaines connexes, comme dans le cas de la théorie hiérarchique, la théorie du chaos et la théorie de la probabilité. Étant une discipline frontalière, il est encore plus difficile de trouver ses propres termes et notions. C'est peut-être pour cette raison que le concept de "système fluvial", à la fois intégrateur et original, est encore plus important. [Chorley et Kennedy \(1971\)](#) avaient défini le concept de « système fluvial » en termes de système complexe, adaptable et qui évolue à travers les actions-réponses. Le concept de système fluvial peut être utilisé sur de vastes échelles spatiales de l'ordre du million de kilomètres carrés mais également sur de petites échelles de l'ordre de la dizaine de kilomètres carrés et temporelles d'un rang de quelques minutes jusqu'à des milliers d'années. Le syntagme de « *système fluvial* » est utilisé pour faire référence aux processus associés aux rivières, d'une part, et aux dépôts et formes de relief créées par les cours d'eau, d'une autre part [[Smith, 1993](#)]. Le système fluvial est composé par les formes de relief et les processus de provenance fluviale qui les façonnent, dont leurs traits dominants sont la ligne de partage des eaux, les versants et le réseau hydrographique. Le bassin versant déroulé à l'intérieur de la ligne de partage des eaux est, de manière évidente, l'unité majeure d'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire [[Newson et Newson, 2000](#)].

Dans les études hydrologiques, le système fluvial représente une approche bivalente, avec une importance en même temps théorique que pratique, et l'approche systémique de la dynamique hydro-sédimentaire est employée pour la gestion des ressources d'eau et pour l'ingénierie hydraulique. Au long de l'évolution de ce concept, on a pu constater que la plupart des recherches portant sur les systèmes fluviaux peuvent avoir un caractère appliqué, et il est déjà bien connu que les spécialistes dans le domaine de la dynamique hydromorphologique entrent en compétition avec les chercheurs dans d'autres disciplines de la science dans le but d'appliquer les projets de restauration écologique des rivières et de régularisation des lits [[Lane, 1955](#); [Brookes et Shields, 1996](#)]. Une importance particulière relève les connexions entre les diverses composantes d'un système fluvial, qui contrôlent la dynamique de l'eau et des sédiments, ainsi que les états d'équilibre/déséquilibre, et qui reflètent les changements climatiques, l'activité tectonique, les effets anthropiques, à une échelle temporelle qui peut commencer dès le Pléistocène [ou plus tôt] et aller jusqu'au présent [[Baker, 1973](#)].

De plus, pour comprendre les facteurs déterminant le régime des débits liquides et solides des rivières, le chercheur dispose d'une série de questions méthodologiques qui emploient des méthodes et source de données variées, parce que la manière dans laquelle on analyse, à une échelle spatiale et temporelle, les effets sur la morphologie du lit peuvent offrir des nouvelles perspectives utiles dans la recherche dans le domaine de la géomorphologie fluviale [[Giardino et Marston, 1999](#)].

Le titre de la thèse fait référence, en premier lieu, à l'hydrologie et à la géomorphologie fluviale. Si l'hydrologie est une branche de la géographie physique qui étudie les propriétés générales des eaux de surface, leurs mouvements et distribution sur la Terre, en temps et dans l'espace [[Pişota et Zaharia, 2005](#)], la géomorphologie fluviale est une discipline de synthèse, avec des racines dans la géologie, la géographie

et la gestion des bassins versants, et qui se fonde sur des domaines tels que l'hydrologie, la chimie, la physique, l'écologie, l'histoire humaine et l'histoire naturelle. Une des meilleures représentations des principes régissant la géomorphologie fluviale a été offerte par Lane (1955), et son actualité se maintient jusqu'au présent.

Au fur et à mesure, la géomorphologie fluviale a évolué afin de permettre, au présent, la modélisation conceptuelle des réponses hydromorphologiques complexes, utilisant une extension de la balance de Lane, datant des années 1950, qui compte aussi des variables hydrologiques et hydrauliques portant sur la géométrie de profil longitudinal et transversal de la rivière [Dust et Wohl, 2012]. Par ailleurs, des travaux récents parus dans *Geological Society of American Bulletin* ont visé des sujets comme les bandes actives des rivières, la morphologie des lits suite aux processus de soulèvement tectonique (« *uplifting* ») et d'entraînement vers l'aval des matériaux générés par l'action de l'érosion sur le fond du lit, les berges et les versants [Humphrey et Konrad, 2000 ; Liebault et Taillefumier, 2000; Arnaud-Fassetta et Fort, 2004; Ioana – Toroimac, 2009 ; Ioana – Toroimac et al., 2010 ; Liébault et al. 2010].

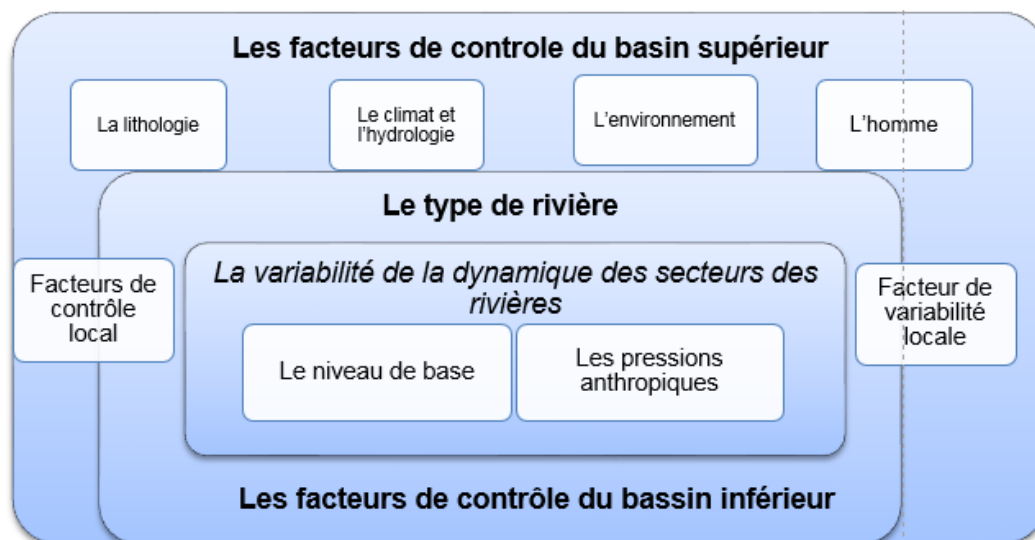
D'autres relations conceptuelles [Schumm, 1969] permettent la prévision des changements morphologiques du lit (y compris en ce qui concerne la dimension et la tendance d'évolution des méandres) suite aux changements dans le débit liquide ou l'apport sédimentaire. Le modèle conceptuel proposé par Schumm a été repris et développé en 1989 par Kellerhals et Church, qui ont pris en considération trois variables de contrôle : le débit morphogène  $Q_{mph}$  (« channel forming discharge », le débit d'alluvions en suspension (noté avec  $Q_{sus}$ ) et les alluvions en charriage (« charge de fond », noté avec  $Q_{ch}$ ). Afin de décrire la relation entre la largeur et la profondeur du lit ( $W/D$ ), la longueur d'onde des méandres, la sinuosité du lit et sa lithologie, ils ont utilisé les trois types de débits présentés en haut. Dix ans plus tard, Wasson et ses collaborateurs (1998) ont introduit la notion de « *largeur à plein bord* », qui correspond à la notion de débit morphogène, dans le contexte du concept d'équilibre dynamique (« *graded stream* »), employé pour la première fois par Gilbert (1887) et puis formalisé par Kesseli (1941) et Mackin (1948).

Selon Chorley et Kennedy (1971), le système fluvial est concerné par deux aspects fondamentaux : le système morphologique (lits des rivières, plaines d'inondation, versants - pentes, etc.) et le système en cascade du flux d'eau et de sédiments. Pour analyser ces deux systèmes, choisir les bonnes variables issues du domaine de la géomorphologie fluviale et des disciplines connexes constitue, dans la plupart des cas, une des premières étapes dans le développement d'une meilleure connaissance des processus se déroulant dans le système fluvial, tels que les processus à l'interface du lit mineur avec la plaine inondable, ou la connectivité entre la rivière et les versants [Alcayaga, 2013].

La perspective du système morphologique, utilisée de plus en plus dans les sciences de l'environnement, a exercé une influence décisive sur le développement de la géomorphologie fluviale en tant que science [Bennet et Chorley, 1978, cités par Kondolf et Piegay, 2013]. Ainsi, une série de travaux dans le domaine de l'environnement en général, et des processus fluviaux en particulier, sont orientés vers la théorie des systèmes (par exemple, White *et al.*, 1992, Bravard et Petit, 2000). Appliqué à la géomorphologie fluviale, le concept de système a mis en évidence les interactions avec le système fluvial et les liaisons entre la géomorphologie, les sciences connexes (l'écologie, l'hydrologie, la géologie) et la gestion des ressources d'eau [Schumm, 1977 ; Doyle et collab., 2007]. Par conséquent, la recherche dans le domaine de la géomorphologie fluviale est, au présent, fortement influencée par le concept de système

et exhibe un vigoureux caractère interdisciplinaire dans des pays comme la France [Amoros et Petts, 1993 ; Schmitt *et al.*, 2000], les États-Unis [O'Connor, 1983], la Belgique [Petit, 1984 ; Bravard et Petit, 2000].

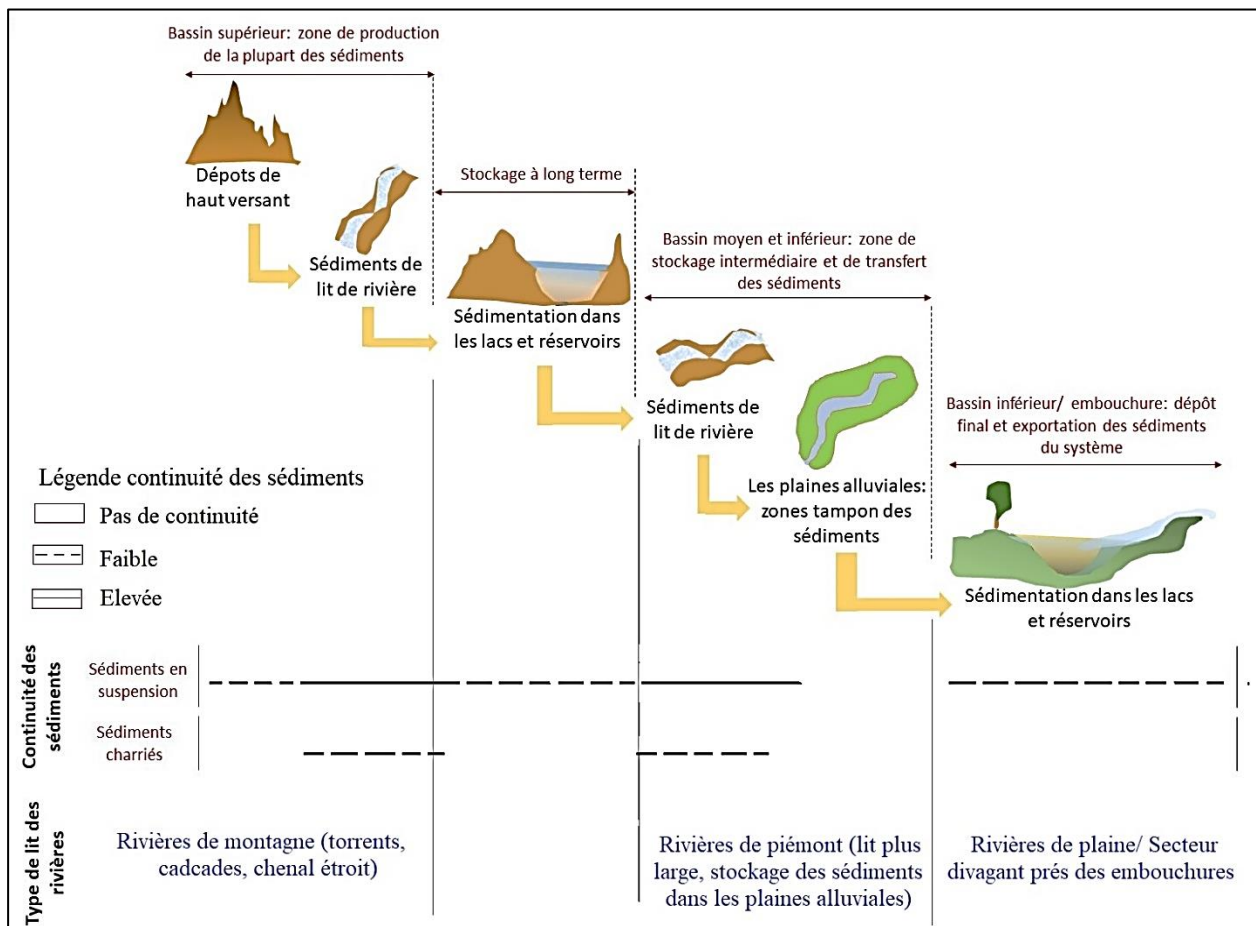
De plus, le concept de « système morphologique » (*Figure II.1*) est devenu un instrument perçu dans le sens qu'il permet l'établissement et l'organisation des méthodes de recherche. Bien que l'approche réductionniste soit très adéquate pour la description des processus, elle ne peut pas aider dans la compréhension générale du système fluvial et de son évolution holistique.



**Figure II.1.** Le concept de système fluvial (le modèle de Kondolf et Piegay, 2003)

Dans ce sens, le système paraît comme « un concept cadre » en vue d'établir une perspective intégrée sur les phénomènes et processus hydromorphologiques à des diverses échelles temporelles et spatiales, conduisant les spécialistes dans la gestion des ressources d'eau à une meilleure compréhension du concept de développement durable appliqué aux systèmes fluviaux [Chorley et Kennedy, 1971 ; Brookes et Shields, 1996 ; Piegay *et al.*, 1996].

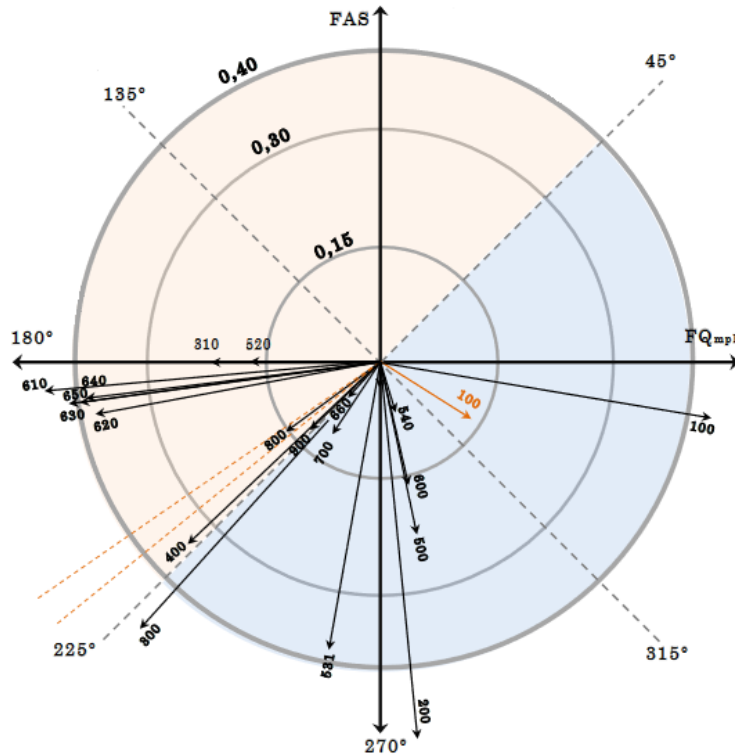
De l'autre côté, un système est défini comme une combinaison d'éléments qui forment un tout unitaire et entre lesquels il y a des connexions, interrelations, des transferts d'énergie et de matière [Alcayaga, 2013]. L'attribut de « fluvial » conféré au système qui fonctionne à l'intérieur de la ligne de partage des eaux d'un bassin versant est un mot provenant du latin « **fluvius** », avec le sens de rivière, mais quand il est interprété dans son vrai sens, un système fluvial implique non seulement le réseau hydrographique avec tous ses attributs morphologiques, mais aussi les zones de transfert et de stockage des sédiments. D'après Chorley et Kennedy (1971), le système fluvial apparaît ainsi comme un système adaptatif complexe, englobant les processus et les systèmes déterminés par deux composantes physiques : le système morphologique des lits, plaines inondables, versants, embouchures etc., et le système type « **cascade** » de la dynamique des flux de matière liquide (l'eau) et solide (les sédiments) (*Figure II.2*). Ce système en cascade fonctionne non seulement pour la composante liquide des matières transportées par les rivières, mais également pour la continuité de la circulation et du transfert des sédiments dans le bassin hydrographique, en particulier lors des crues à faible retour [Joyce *et al.*, 2018]. Cette notion s'applique particulièrement à la continuité des sédiments, induisant ainsi une réponse géomorphologique d'une rivière à une crue extrême. De toutes ses composantes du système fluvial, les affluents jouent un rôle important dans les cascades de sédiments [Schrott, 2015].



**Figure II.2.** La structure de la cascade de sédiments des zones source vers les zones de dépôt des sédiments et la continuité relative des sédiments dans chaque stockage en l'absence de crue [d'après [Joyce et al. \(2018\)](#), modifié à partir du modèle de sédiments en cascade simple de [Schumm \(1977\)](#)]

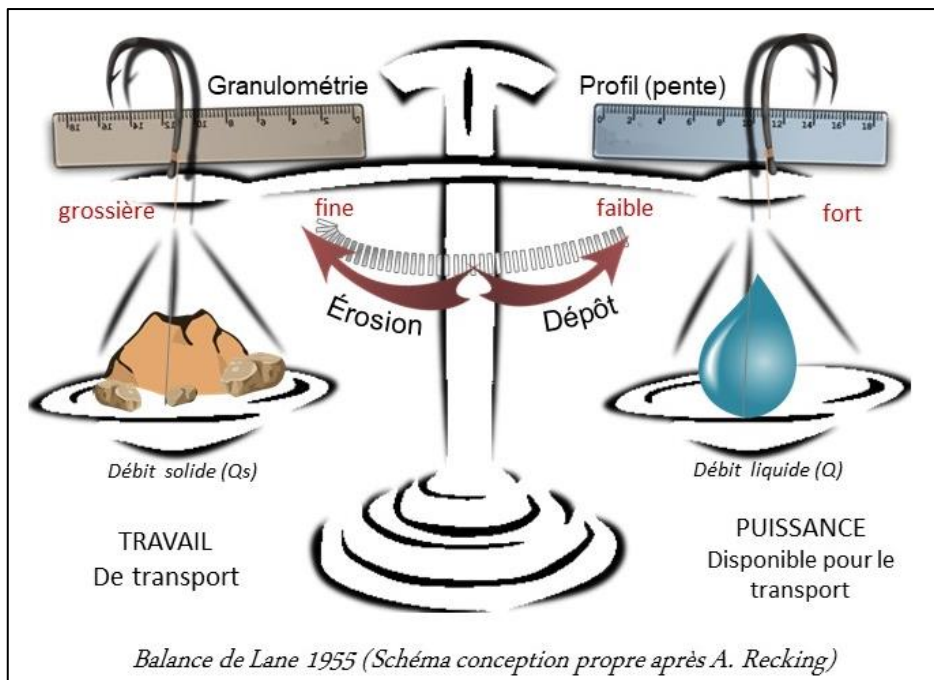
Le concept de « cascade de sédiments » va en relation non seulement avec la géomorphologie fluviale, mais surtout avec la dynamique hydro-sédimentaire. Ce concept fournit en plus un aperçu complet qui traite du transport de sédiments à travers le paysage [[Burt et Allison, 2010](#)].

Le système fluvial est donc un système dynamique et adaptatif, parce qu'il change progressivement à une échelle de temps humaine et géologique, suite aux processus d'érosion, de transport et d'accumulation [les flux liquides et solides] et réagit aux changements climatiques, de niveau de base, tectoniques ou induites par l'impact des activités humaines. Le temps de réaction de la morphologie et de la dynamique du système fluvial au changement des variables de contrôle naturelles ou anthropiques peut varier de quelques jours à de milles ou dizaines de milliers d'années. Cette évolution a été bien démontrée sur la rivière Isère par [Alcayaga \(2013\)](#), qui s'est intéressé aux altérations hydrologiques et de l'alimentation solide, pour la prédiction des trajectoires d'évolution de variables morphologiques de la rivière impliquées la transition d'un état d'équilibre à un autre (**Figure II.3**). A l'échelle des lits des rivières, le système fluvial peut être schématisé sous la forme d'un ensemble de variables de contrôle/externes ou indépendantes, comme le débit solide ou le débit liquide maximum, et d'un ensemble de variables d'ajustement/internes, ou dépendantes (par exemple le type de lit, la longueur des méandres, la pente longitudinale, la profondeur de la rivière). La rivière est ainsi vue comme un système en équilibre dynamique, dont la morphologie fluviale change avec le changement des facteurs de contrôle. Le rythme de changement de l'équilibre diffère d'un système fluvial à l'autre, en fonction des ajustements imposés par les processus d'érosion, de transport et d'accumulation.



**Figure II.3.** Vecteurs d'altération du système fluvial de l'Isère (b.v. Rhône). En orange – trajectoire de l'évolution (intensités, directions et tendances) d'une situation extrême issue des essais de sensibilité pour le calcul d'un débit morphogène ( $FQ_{mph}$ ). FAS est l'indicateur de l'altération du régime de sédiments [Alcayaga, 2013]

La relation entre le débit liquide [ $Q$ ] et le débit solide, ou le transport sédimentaire [ $Q_s$ ], sur laquelle agissent aussi une série de variables de contrôle et de réponse, a été représentée par une balance dont les plateaux peuvent s'incliner en faveur des processus d'érosion ou d'accumulation, selon les tendances du système morphodynamique (Figure II.4).



**Figure II.4.** Schéma de l'équilibre dynamique entre les facteurs de contrôle et de réponse d'un système fluvial [Rosgen, 1996], illustrée par la balance de Lane (1955). Adaptation propre

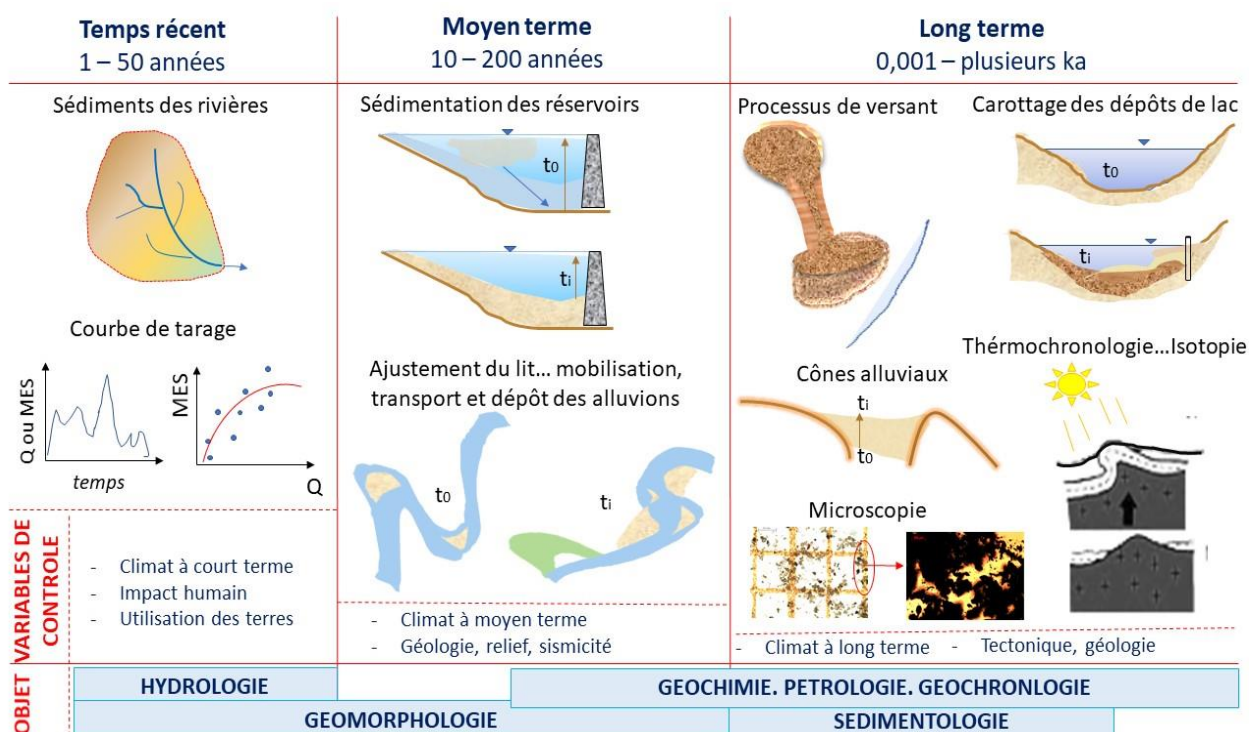
Également, l'intensité du changement peut être moyenne, conduisant à des adaptations ou à des changements de style fluvial, ou drastique, menant à la transformation presque totale de la morphologie d'un cours d'eau, suite à l'intervention humaine [Wohl, 2012]. Ce dernier cas porte le nom de



« métamorphose fluviale » [Piegay et Schumm, 2003], en soulignant ainsi les changements extrêmes subis par un système fluvial à cause d'une rupture dans sa dynamique hydromorphologique et au dépassement des seuils morphologiques [Schumm, 1980 ; Werritty, 1997].

Le concept de système fluvial est étroitement lié à l'évolution des approches dans l'étude des études de bilan sédimentaire, des flux de sédiments et des stockages, car en fin de compte, les processus fluviaux sculptent le paysage, érodent les reliefs, transportent les sédiments et les déposent pour créer de nouveaux reliefs. L'approche du concept de système fluvial peut faciliter la compréhension holistique de la dynamique hydro-sédimentaire et de la variabilité spatiale et temporelle de leurs flux [Brown, 1996]. Cette approche est aussi utile dans la gestion des bassins versants, offrant des réponses aux problèmes hydrauliques, hydrologiques et écologiques suite aux aménagements et aux pressions anthropiques.

Une approche holistique de la dynamique des rivières nécessite une approche multidisciplinaire, raison pour laquelle le concept de système fluvial emprunte un nombre toujours croissant de méthodes et théories des autres disciplines, comme l'ingénierie hydraulique (par exemple Thorne *et al.*, 1997 ; Gilvear, 1999), l'écologie et la restauration des rivières [Hupp *et al.*, 1995]), la science et la gestion de l'environnement (par exemple Brookes, 1995 ; Thorne et Thompson, 1995 ; Kondolf et Larson, 1995, Bravard *et al.*, 1999; Petit *et al.*, 2015), la géochimie et la pétrologie organique [Jasy et Chowdhury, 2010 ; Kiekebosch-Fitt, 2012 ; Olley *et al.*, 2013 ; Zhang *et al.*, 2013 ; Evans, 2016] Ces interactions se produisent dans les deux sens, ce qui signifie non seulement que la géomorphologie fluviale est appliquée dans ces domaines proches, mais aussi que des outils/instruments de ces domaines sont appliqués pour résoudre des problèmes de géomorphologie fluviale (*Figure II.5*).



**Figure II.5.** Approches complexes dans la géomorphologie fluviale et les sciences connexes du système fluvial, budget des sédiments, flux de sédiments et milieux de stockages (adapté à la question d'un bassin versant à partir du modèle de Schrott, 2015)

En synthèse, quelques avantages de l'approche systémique de la dynamique hydro-sédimentaire sont:

- La flexibilité du passage d'une échelle temporelle/spatiale à une autre, après le moment où les caractéristiques des composantes d'une échelle deviennent connues.

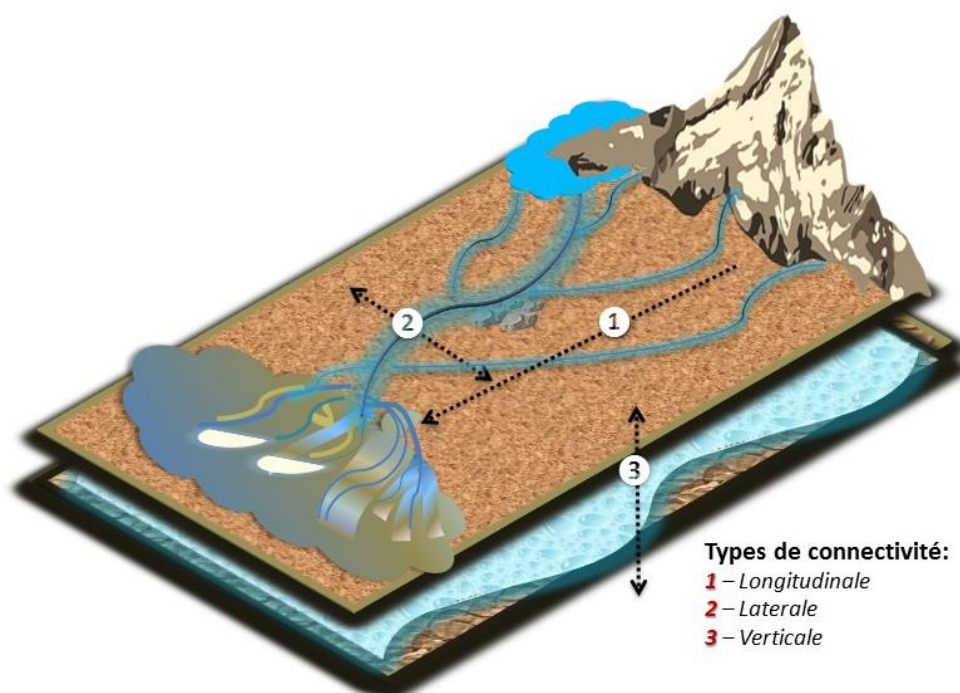
- L'accent mis sur la complexité géographique d'un système fluvial et sur son importance pour la compréhension des causes et des changements déterminés par certains facteurs naturels ou anthropiques.
- La possibilité de formuler des questions interdisciplinaires et d'appliquer les connaissances issues des domaines techniques pour résoudre des problèmes de gestion au niveau des bassins.

Néanmoins, cette approche présente aussi des certaines limitations :

- Elle ne peut pas être utilisée de manière indépendante, mais seulement en tant que cadre général de formulation des hypothèses scientifiques qui seront ultérieurement testées et modélées mathématiquement ou dans un milieu GIS.
- Suppose beaucoup de temps, parce qu'il est nécessaire de couvrir tout l'espace d'un bassin versant et il faut appliquer des méthodes et modèles complexes, situés au carrefour de plusieurs sciences (données obtenues sur le terrain, des documents bibliographiques, cartographiques).
- Se fonde largement sur des lois empiriques et sur des jugements de valeur des experts, et pas nécessairement sur des lois physiques contrôlant le système fluvial.
- Dépend de l'expérience des utilisateurs et des données disponibles, et peut être soumise à des erreurs d'interprétation.

### 2.1.2. Le concept d'"Hydrosystème"

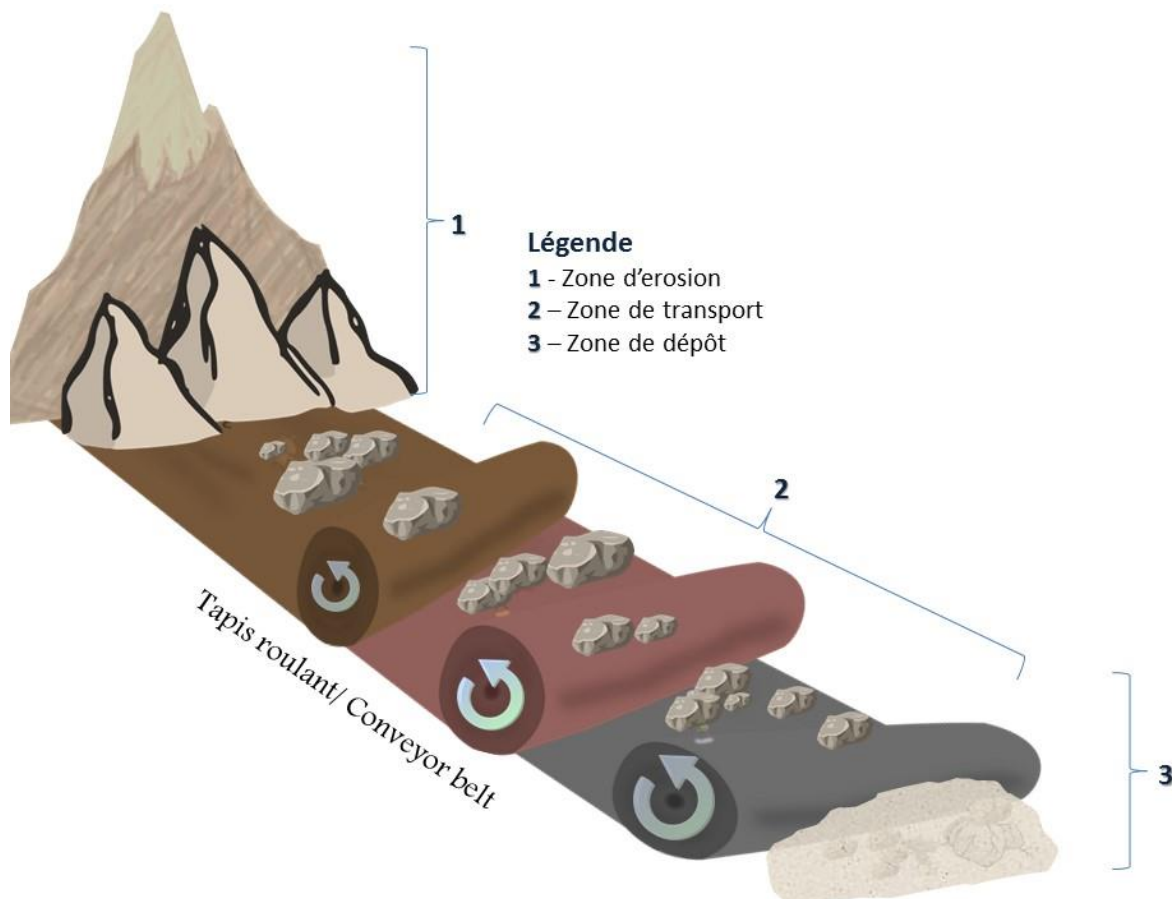
Le concept d'"hydrosystème" suppose un cadre de recherche adéquat pour la valorisation des interactions entre les différentes composantes de l'environnement qui peuvent agir, à des divers pas de temps et échelles spatiales, en tant que facteurs de la dynamique hydro-sédimentaire. Il a été introduit par Roux (1982) et par Amoros et Petts (1993), et puis il a été repris par Piegay et Schumm (2003), selon lesquels l'hydrosystème pourrait être représenté comme un système fluvial tridimensionnel (3D) dépendant des changements dynamiques et bidimensionnelles de l'énergie et de la matière sur les axes suivants : longitudinale (amont/aval), latérale (lit, berges, plaine inondable) et verticale (ruissellement de surface/souterrain) – *Figure II.6.*



**Figure II.6.** L'hydrosystème avec ses 3 axes. Création propre, selon le concept d'Amoros et Petts (1993)

Son intégrité dépend de la dynamique des interactions entre les processus hydrologiques, géomorphologiques et biologiques qui se produisent sur les trois dimensions, à des diverses échelles temporelles [Alcayaga, 2013].

Kondolf (1994) va plus loin et ajoute aux éléments représentés dans le système 3D d'Amoros et Petts les zones d'érosion, de transport et d'accumulation, représentées comme un tapis roulant dans un mouvement et transformation perpétuelles (*Figure II.7*).



**Figure II.7.** La représentation des processus d'érosion, transport et accumulation sous la forme d'un tapis roulant. Création propre selon le concept de Kondolf (1994)

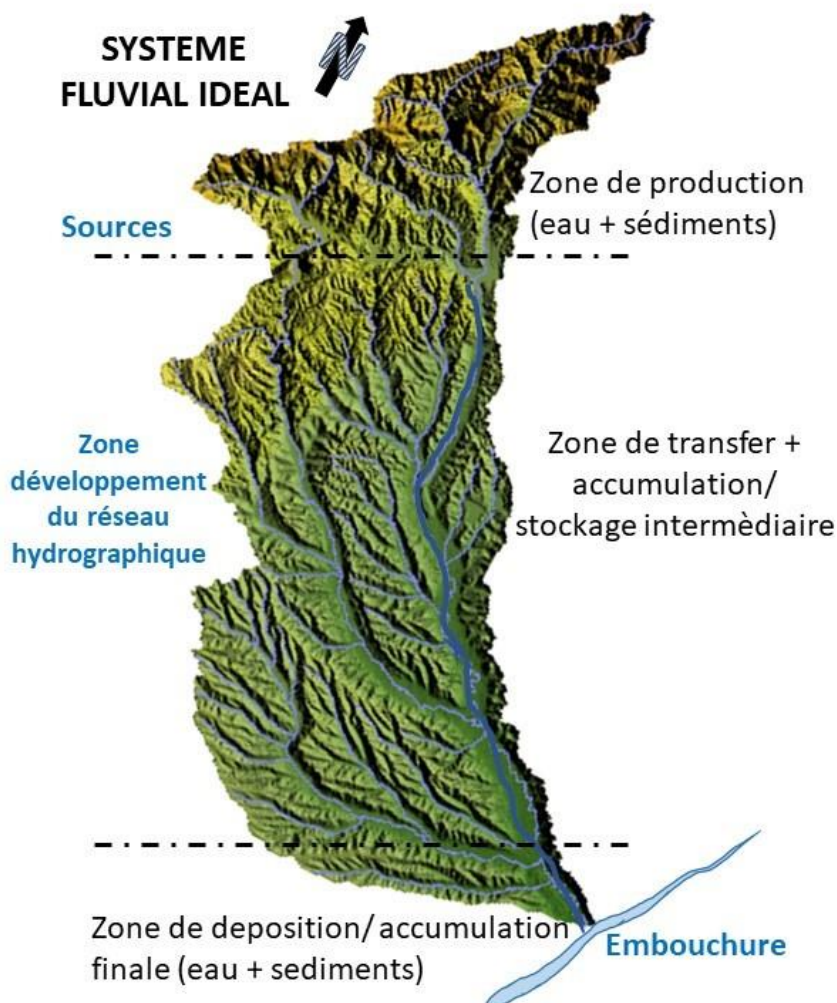
En effet, le mouvement des sédiments grossiers dans et entre les zones de production, de stockage et de transfert des sédiments a été comparé à une «bande transporteuse» [Ferguson, 1981] dans laquelle les sédiments sont transférés et stockés sur une gamme d'échelles temporelles. Les transports de sédiments influencent donc la continuité des sédiments et les éventuels changements géomorphiques en aval; cela est particulièrement pertinent lors d'événements moins fréquents de magnitude supérieure où les zones sources et de dépôt des sédiments peuvent changer rapidement sur une courte période [Davies et Korup, 2010; Fryirs, 2013].

Si nous devons relier ces deux concepts mentionnés en haut (celui de l'hydrosystème avec les trois types de connectivité et celui du système fluvial complété par sa représentation sous la forme d'une bande transporteuse), l'hydrosystème paraît comme une extension 3D du système fluvial. En partant du concept de système fluvial vu comme un tapis roulant dans l'acception de Schumm (1997), il peut être divisé dans trois sous-systèmes, en fonction du processus dominant. D'après ce dernier auteur, du point de vue des processus caractéristiques pour la dynamique hydro-sédimentaire, afin de simplifier, sur l'axe longitudinal d'un système fluvial 3D ou d'un hydrosystème on peut distinguer trois sous-systèmes :



- **La zone 1** – le bassin supérieur, qui coïncide avec la zone-source de l'eau et des sédiments (généralement, la production des sédiments, sans exclure, dans une mesure assez réduite, leur stockage initial ou intermédiaire).
- **La zone 2** – le bassin moyen ou le secteur de transfert, où les entrées de matière sont presque égales avec les sorties (généralement, on considère que c'est la zone où rien est gagné ou perdu, dans le langage des sciences économiques).
- **La zone 3** – le bassin inférieur, ou le secteur de dépôt (confluence, delta, cône alluvial).

De manière apparente, ces trois sous-divisions d'un hydrosystème paraissent réductionnistes et artificielles, car il n'y a aucune loi qui se limite seulement à la production, le stockage, l'érosion et le transport des sédiments. Néanmoins, dans chacune des zones, l'un des processus est censé à prédominer (*Figure II.8*).



**Figure II.8.** Illustration des trois zones longitudinales d'un système fluvial (ou bien les 3 zones de la première dimension s'un hydrosystème). L'exemple du bassin de la rivière Motru, affluent de premier ordre de la rivière Jiu. Création propre d'après Schumm (1977)

Lorsque les trois secteurs sont rapportés au système caractérisé par les processus morphodynamiques du budget alluvial, plusieurs auteurs [Bennett, 1974; Dumitriu, 2007] ont distingué les fonctionnalités suivantes:

- (i) La phase "*bassin versant*" ou "*highland*", représentée par les processus qui caractérisent le détachement et le transport des sédiments, en relation avec un événement pluvial par exemple. En tant qu'espace, cette phase se manifeste dans tout le bassin hydrographique au-delà des

limites du lit majeur d'une rivière ;

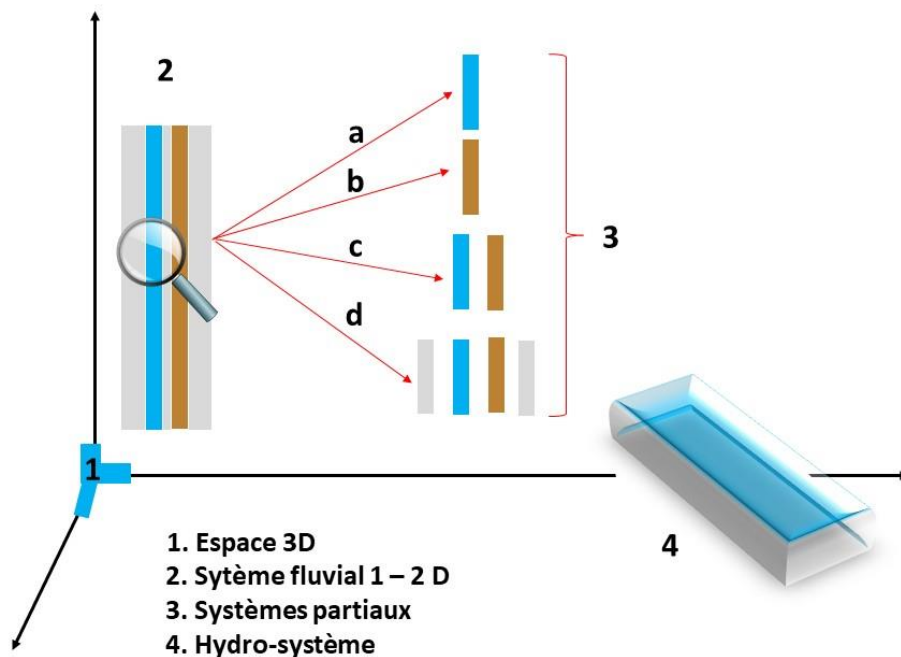
- (ii) Phase "*lit majeur*" ou "*lowland*", où la capacité d'un lit de rivière à stocker le surplus d'eau et de sédiments et la connexion entre le système hydrographique et les versants sont observées.

### 2.1.3. Le système total vs. le système partiel

Il y a plusieurs approches du système fluvial. Les plus audacieuses tentent d'intégrer tous les aspects caractérisant un système fluvial dans toute sa complexité, mais, en général, les informations disponibles ne sont pas suffisantes pour permettre une caractérisation complète du système. Plutôt, on nous recommande d'étudier une seule composante du système fluvial, comme le régime du débit solide et la manière dans laquelle il contribue à la création des connexions hydromorphologiques entre les zones de production, transport et stockage des sédiments [Buffington, 2012]. Si les études hydromorphologiques sont caractérisées par des limites spatiales, elles peuvent avoir aussi des limites temporelles. Dans ce sens, le système fluvial doit être toujours regardé comme un système partiel, parce que la dimension temporelle n'est pas limitée, comme celle spatiale, désignée par l'espace à l'intérieur de la ligne de partage des eaux, mais change chaque saison, année, décennie ou siècle. Ainsi, les systèmes hydromorphologiques peuvent être étudiés en prenant en compte des diverses échelles temporelles, selon les objectifs de la recherche, orientés vers l'explication des traits actuels du système et sa sensibilité aux changements parus au niveau des flux liquides et solides [Grant, 2012].

En même temps, le système fluvial peut être regardé comme un modèle conceptuel, utilisé en tant qu'instrument de formulation des hypothèses scientifiques sur la base desquelles on pourrait répondre à une série de questions portant sur les facteurs locaux ou de premier ordre qui contribuent au changement du régime hydro-sédimentaire d'une rivière [Gregory, 1987 ; Buffington, 2012 ; Alcayaga, 2013]. De plus, le concept de système fluvial peut servir à l'intégration des études de cas dans un contexte spatial plus large, et à leur placement dans une échelle temporelle plus vaste, en partant de l'influence des processus hydromorphologiques produits en amont sur les changements à long terme au niveau du sous-système fluvial en aval [Bravard, 1987 ; Agnelli *et al.*, 1992].

Le système fluvial comprend différents composants à la fois ouvertes et interactives, tels que les unités géomorphologiques ou hydrologiques, qui sont imbriquées: le schéma de drainage les inclut toutes et forme l'hydrosystème ; à l'intérieur, il y a des tronçons de rivière qui interagissent et communiquent au sein d'une ou entre plusieurs rivières (auprès des confluences). Dans un tronçon de rivière, on peut distinguer les caractéristiques du chenal en fonction du secteur en amont ou en aval où le tronçon de la rivière est considéré. À l'intérieur de tout cela se trouvent des chemins de sédiments, des pièges à sédiments, des réservoirs de stockage et des vecteurs de transfert [Kondolf et Piegay, 2003]. Dans ce contexte, l'intégration du concept d'hydrosystème et la considération d'une seule composante du système fluvial (système partiel) peuvent faciliter la réalisation d'études comparatives, dans le dessein de généraliser des théories et méthodes scientifiques. Pour mieux comprendre la différence entre les trois notions (système fluvial, système partiel et hydrosystème), nous les avons représentées dans la **Figure II.9** comme formes géométriques simples ou plus complexes.

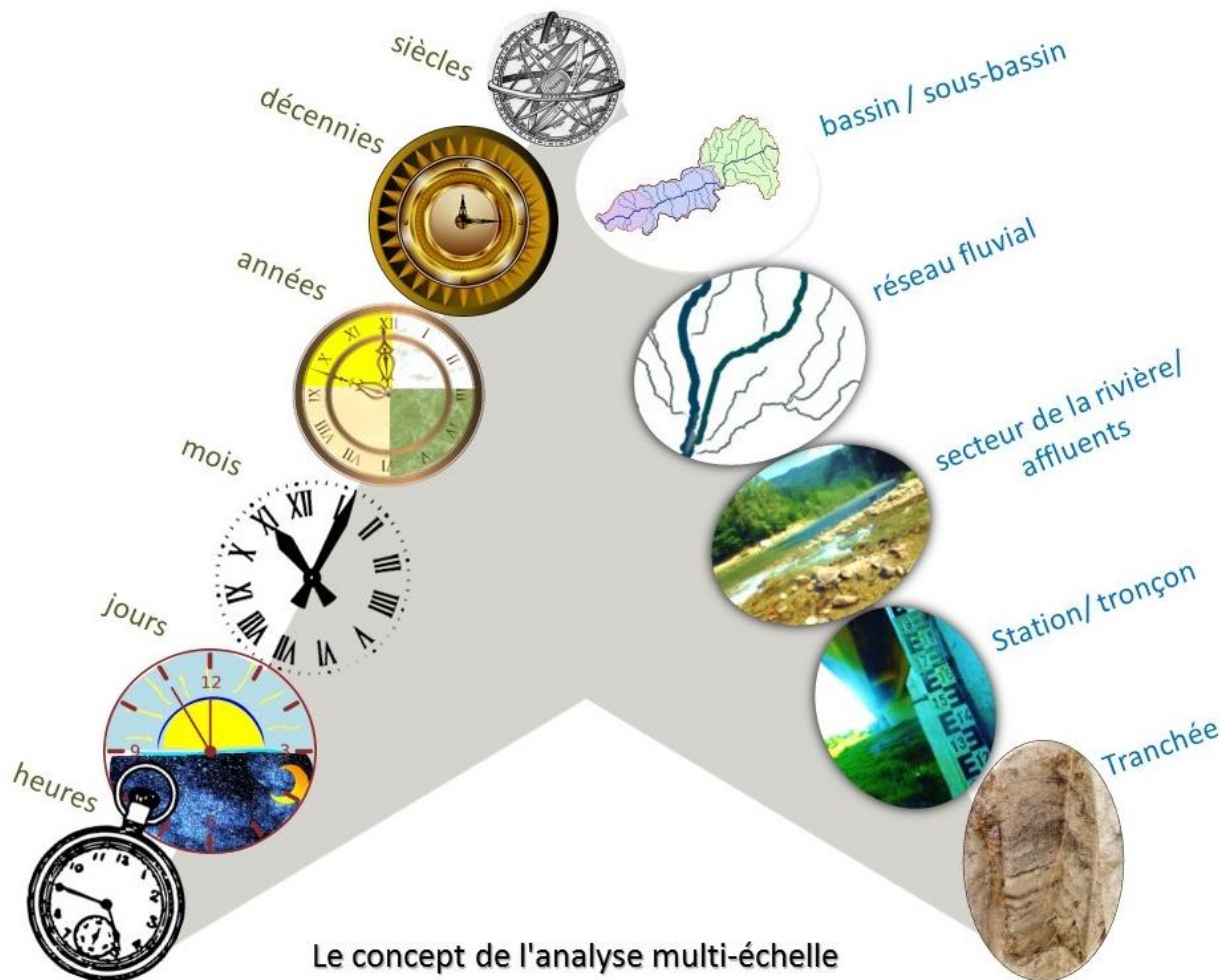


**Figure II.9.** L'idéalisation du système fluvial, du système partiel et du hydro-système (Conception propre). Les quatre grandes catégories de système partiel selon les processus et flux impliqués : **a** - La rivière dans les différents secteurs/ Le flux liquide ; **b** - Les sédiments/ Le flux solide ; **c** - Interactions flux liquide · flux solide ; **d** - Interactions multiples flux liquide · flux solide · autres composantes du système fluvial

Dans une première étape de la compréhension, nous devons voir cet espace 3D non seulement strictement géométrique (un bassin hydrographique représenté par la longueur, la largeur et l'altitude ou la profondeur des formations pédo-lithologiques, par exemple), mais aussi comme un système d'interactions 3D entre les flux et les facteurs / vecteurs / processus, à travers l'érosion, transport, accumulation et la connectivité dans tous les sens. Ultérieurement, l'analyse du système fluvial peut constituer la base d'une comparaison entre les différentes composantes du système, qui sont ouvertes et intégratives (le modèle réseau de drainage > secteur de rivière > flux sédimentaires), permettant la description par des attributs spécifiques (par exemple un secteur de lit pourrait être défini par sa géométrie, les processus de dynamique des flux liquides et solides, ou par des changements morphologiques). Puis, chaque composante pourrait être comparée avec une autre et analysée à la même échelle temporelle et spatiale, afin de trouver les similitudes et les différences entre eux [Amoros et Bravard, 1985].

## 2.2. Approche multi-échelle

Grace à leur dynamique spatiale et temporelle, les systèmes fluviaux peuvent être étudiés à des différentes échelles d'espace et de temps. Suite au développement des nouvelles technologies et bases de données, il est possible de poser des questions à des divers niveaux dans l'espace – des processus et des phénomènes hydromorphologiques à l'échelle d'une station hydrométrique, d'un tronçon de rivière, d'un secteur ou même d'un bassin entier (*Figure II.10*). Parallèlement, le temps joue également un rôle déterminant dans la performance de certains processus hydro-sédimentaire, les analyses de séries chronologiques étant toujours placées sur un ou plusieurs escaliers. En fonction de la résolution temporelle et du but de l'analyse, nous trouvons une succession d'échelles allant de l'heure et du jour à l'année, voire même plusieurs siècles. Au-dessus des quelques siècles, le système fluvial émerge de la sphère de l'hydrologie et entre dans celui de la paléo-hydrologie et de la géomorphologie.



### Le concept de l'analyse multi-échelle

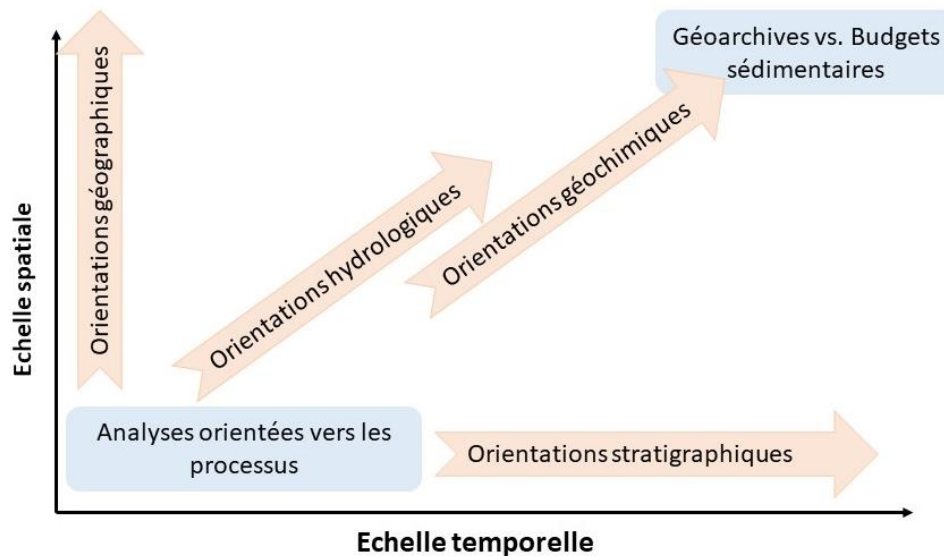
**Figure II.10.** Les échelles spatio-temporelles d'analyse du système fluvial. Conception propre

Ainsi, l'analyse des processus hydromorphologiques et des flux hydro-sédimentaire peut se réaliser au niveau d'un secteur du bassin versant, du réseau hydrographique, d'un affluent ou d'un tronçon de la rivière principale, jusqu'au niveau d'une station de mesure, ou aussi d'un endroit d'accumulation des sédiments formant un dépôt.

Les matériaux transportés par la rivière et les sédiments peuvent être analysés aussi à plusieurs échelles : depuis celle de la particule et de sa mécanique jusqu'à celle du bassin versant. Cet aspect fera l'objet d'une discussion détaillée dans un autre chapitre.

Dans des nombreuses études à la frontière entre les méthodes stratigraphiques et celles spécifiques à la géochronologie de l'utilisation des terres, le problème des échelles spatiales et temporelles dans la géomorphologie fluviale a été résolu en complétant les informations offertes par les documents cartographiques portant sur le changement de l'usage des terres avec les données issues de l'emploi des instruments de la géologie [Jacobson et Gran, 1999; McKennedy, 1997; Peterson, 1996]. Dans toutes ces approches, il n'est pas toujours facile d'obtenir des informations à la même échelle visant la relation entre les éléments de la dynamique des sols (y compris les effets des changements dans l'usage du sol) et les processus morphologiques dans le lit [Birkland, 1984], Dans ces cas, une incompatibilité apparait entre les échelles spatio-temporelles impliquées dans ces différentes catégories d'approches, comme l'illustre la **Figure II.11.**





**Figure II.11.** Liens et découplages spatio-temporels entre géoarchéologie, stratigraphie, hydrologie et géomorphologie fluviale (d'après Dickau *et al.*, 2006)

Nous pouvons ainsi étudier les composantes du système à des échelles spatiales et temporelles diverses, mais nous ne pouvons pas ignorer certaines de ces échelles, parce que les lois qui régissent les processus hydromorphologiques à des petites échelles sont les mêmes qui imposent le bon fonctionnement du tout système fluvial.

### 2.2.1. L'échelle spatiale

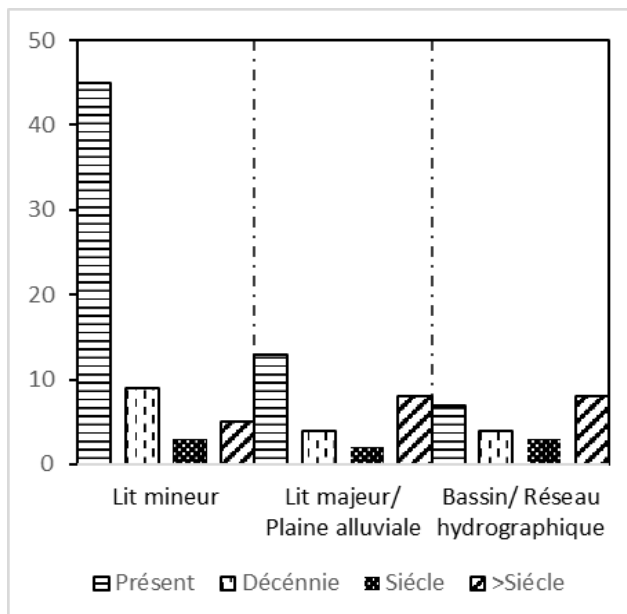
Il y a trois dimensions fondamentales des données spatiales : l'espace, l'attribut et le temps [Chrisman, 1991], ou, dans d'autres mots, « le lieu où on avait observé un certain phénomène hydrologique », « ce qu'on a observé plus précisément » et « quand on avait observé le phénomène » [Flowerdew, 1991]. L'introduction de ces trois dimensions dans le contexte donné est explicable par la nature des informations utilisées à la méso- et macro-échelle du bassin versant.

Le système fluvial et les processus qui lui sont spécifiques peuvent être analysés à des diverses échelles spatiales, en fonction du niveau de détail qui est souhaité par le chercheur. Par exemple, une échelle plus grande, de la taille d'un réseau hydrographique dendritique, peut présenter l'intérêt pour un géologue ou un géomorphologue, tandis que l'analyse des tronçons à des échelles plus fines permettra à un ingénieur en hydraulique de modéliser un tronçon du lit qui présente un intérêt économique [Gilvear, 1999].

Le système fluvial est en même temps caractérisé par une asymétrie du contrôle entre les diverses échelles utilisées dans son analyse. Ainsi, dans la **Figure II.12**, on peut voir que lorsque l'on s'éloigne du moment présent et du lit mineur d'une rivière, la fréquence des études diminue. Ceci est d'autant plus vrai dans une petite ou moyenne zone d'étude (un bassin hydrographique d'ordre 2 ou 3 d'une grande rivière ou d'un fleuve, par exemple), pour lequel il est difficile d'adopter une vision spatio-temporelle globale et de disposer de données à long terme et à une grande échelle spatiale.

Les processus observés à une échelle plus large (une région climatique) influencent les processus à une échelle plus petite (un bassin ou un sous-bassin versant), tandis que la situation inverse est très rarement possible, comme la constate Haberlandt et Radtke (2014), dans leurs démarches de calibrer un modèle hydrologique. En même temps, les changements affectant un secteur d'une rivière (par exemple la construction d'un barrage) peuvent influencer la structure et le mode de fonctionnement hydro-sédimentaire

au niveau du tout sous-système en aval (par l'intensification des processus d'érosion du lit, l'« exhumation » des sédiments gossiers et la simplification de la géométrie du lit).



**Figure II.12.** Schéma de la fréquence de l'utilisation des échelles spatiales et temporelles dans l'étude des systèmes fluviaux [d'après *Kondolf et Piegay, 2003*]

Dans l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire d'un bassin versant (qu'on voit comme un système fluvial), les échelles spatiales rarement dépassent celle qui encadre le bassin lui-même. On ne peut parler de causes de manifestation de processus ou des différentes perturbations pouvant survenir dans le système de bassin hydrographique que dans l'échelle régionale ou nationale. Par exemple, les bassins hydrographiques voisins (qui font partie d'une certaine région géographique, historique et socio-économique) peuvent influencer sur les flux liquides et solides par le biais d'aménagements hydrotechniques qui transcendent les limites du bassin en question. Nous verrons que cela vaut également pour le bassin de la rivière Jiu. Un deuxième exemple serait la gestion des bassins hydrographiques établie au niveau national ou régional, mais qui affecte chaque bassin, avec des manifestations de processus différents, avec des réponses ou des adaptations des systèmes différents selon les cas. Un dernier exemple serait l'impact des activités anthropiques correspondant à une région économique dont fait partie le bassin hydrographique étudié. Nous verrons également ici que le bassin de la rivière Jiu est quelque peu affecté par certaines activités industrielles (exploitation du charbon), qui ne s'arrêtent pas uniquement sur son territoire, mais sont également caractéristiques du bassin voisin, celui de la rivière Olteț.

Dans la suite, nous aborderons certaines échelles spatiales qui, soit ne sont pas conventionnelles et n'ont pas été représentées dans le schéma général de la Figure II.9., soit s'étendent sur un certain espace, mais elles sont liées à d'autres échelles plus grandes.

### 2.2.1.1. La micro - échelle d'un système fluvial

La dimension des particules dans les dépôts de sédiments du lit doit être vue comme un indicateur de la dynamique hydro-sédimentaire de la rivière. La dimension des sédiments en charriage ou en suspension peut être liée à la contrainte de cisaillement générée pendant le transport et à la nature des sédiments (les composantes de la matrice sédimentaire) et peut aussi dépendre des conditions hydrauliques et de la puissance fluviale [Allen, 1985 ; Petit et al., 2015]. Selon la plupart des auteurs, la dimension et le triage des sédiments analysés par échantillonnage maintiennent, en général, les mêmes caractéristiques des

sédiments qui entrent dans le système fluvial [Ichim *et al.*, 1989 ; Kondolf et Piegay, 1995 ; Malavoi *et al.*, 2014]. En même temps, le tri et la variation de la dimension des particules composant les sédiments en charriage peuvent être liées avec la variabilité du régime hydrologique. Néanmoins, en pratique, il y a des difficultés dans l'échantillonnage des dépôts alluviaux et leur représentation statistique pour des analyses quantitatives sédimentologiques [Wolcott et Church, 1991 ; Rice et Church, 1998]. La distribution de la dimension des particules des sédiments déposés dans le lit représente une fonction complexe qui intègre la capacité de transport de la rivière, telle que déterminée par la « capacité » [Hicks et Gomez, 2003, cités par Alcayaga, 2013] et la « compétence » [Nevin, 1946] fluviale, ainsi que les conditions hydrauliques et lithologiques, qui exercent, à leur tour, une grande influence sur la distribution granulométrique.

La capacité de transport et la disponibilité des sédiments varie du point de vue spatial au niveau du lit mineur et du lit majeur. Pour cela, afin de formuler une question sur la dynamique de la rivière, telle que déterminée par l'apport sédimentaire à l'échelle temporelle, on doit premièrement réaliser l'équivalence de l'âge des sédiments avec les processus qui ont eu lieu dans le lit dans le passé (« *age-equivalent units* »), selon Kondolf et Piegay (2003). D'ici découlent les incertitudes visant le temps et le moment du dépôt des sédiments, en partant de l'idée générale que les dépôts fluviaux se forment dans des conditions de pic du débit [O'Connor, 1993].

Dès les années 1970, ont été développées des relations empiriques et théoriques entre la distribution granulométrique et les conditions de l'écoulement, afin de reconstituer les conditions hydrauliques associées aux dépôts fluviaux générés par chaque crue individuelle et qui sont spécifiques aux différents types d'environnements fluviaux [Baker, 1973 ; Kehew et Teller, 1994 ; Lord et Kehew, 1987]. Les méthodes associées à la notion de « *compétence fluviale* » peuvent être appliquées dans une grande variété de cas, dont la plupart concernent les connexions empiriques entre la dimension des particules et la puissance de transport de la rivière. Celles-ci offrent des prédictions locales de la contrainte de cisaillement, de la compétence de transport, de la vitesse d'écoulement et du débit.

Toutefois, il faut reconnaître que les limites de la recherche sur la base des critères visant la compétence de la rivière sont généralement assez importantes, et découlent des aspects suivants :

- Les difficultés dans l'échantillonnage des particules plus grandes du dépôt sédimentaire [Church, 1978; Wilcock, 1992].
- Les erreurs associées aux relations empiriques entre la dimension des clastes et les conditions de l'écoulement [Church, 1978; Costa, 1983]

Une catégorie de caractéristiques nécessaires à la caractérisation de l'environnement fluvial, qui n'appartient pas nécessairement à une catégorie particulière, est représentée par la sous-échelle des unités pédologiques. Mises en relation avec la mobilité du lit, les caractéristiques des sols jeunes formés au long des rivières peuvent présenter un réel intérêt pour l'interprétation des conditions de l'environnement fluvial et des changements environnementaux ayant des effets sur la variabilité hydromorphologique [Delmas *et al.*, 2009]. L'étude minéralogique des sols et des lithologies associées aux dépôts alluviaux peut aider à une meilleure compréhension de la variation des conditions locales d'humidité, qui, à leur tour, doivent être interprétées dans le contexte de la variabilité de l'écoulement et de la configuration/du niveau de la nappe phréatique [Birkland, 1984 ; Kemp, 1985].

Le changement de l'utilisation des terres peut aussi affecter les conditions de formation et de

propagation des flux liquides et solides, conduisant à des changements importants dans l'écoulement des rivières et dans les environnements fluviaux [Nolan *et al.*, 1995; Trimble et Lund, 1982; Collier *et al.*, 1996; Arnold *et al.*, 1982].

### 2.2.1.2. La méso- et la macro-échelle spatiale

On définit la méso-échelle spatiale en se référant aux situations concrètes en hydrologie, comme toute représentation du système hydrographique et de ses composants, d'un tronçon d'une rivière à un bassin hydrographique de plusieurs milliers de kilomètres carrés. La macro-échelle spatiale englobe tout ce qui dépasse plusieurs milliers de kilomètres carrés ou plusieurs centaines de kilomètres, comme un grand fleuve ou un bassin hydrographique de plusieurs dizaines de kilomètres carrés.

Cet emboîtement d'échelle pose le problème de la prise en compte des échelles plus fines dans ces études à méso- et macro-échelle. Et au-delà de la représentation conventionnelle et des données disponibles, les processus qui influencent tout une rivière ou tout un bassin fluvial soient les mêmes que ceux qui se produisent dans un espace confiné (par exemple à l'échelle d'un site d'accumulation alluviale),

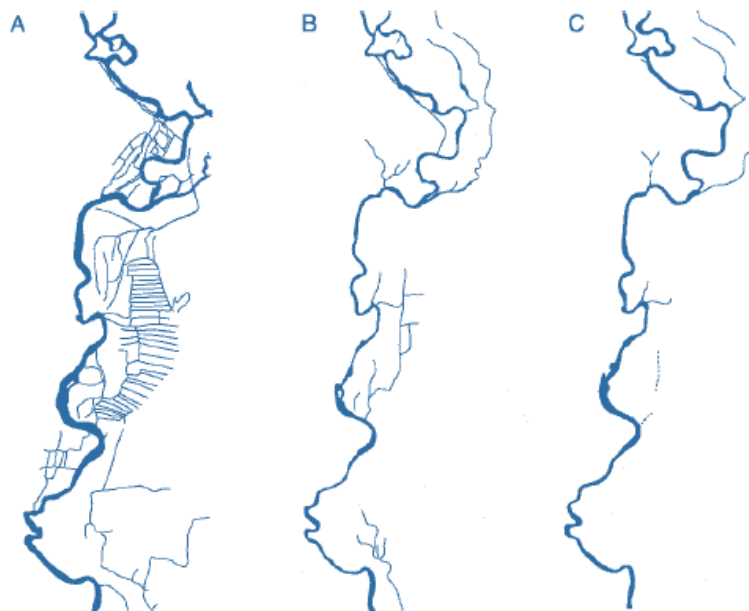
L'information fournie par les plateformes aériennes ou par des différentes cartes thématiques facilite les analyses de géomorphologie fluviale à des échelles spatiales plus larges. Néanmoins, leurs désavantages restent dans leur prix élevé et le fait que, parfois, ces plateformes ne sont pas disponibles à des échelles temporelles et spatiales nécessaires pour observer des processus hydromorphologiques expliquant ou généralisant les observations ou les mesurages réalisés à des petites échelles.

Bien que l'analyse des produits spectraux offerts par les plateformes satellitaires peuvent généraliser et placer dans un contexte spatial la connaissance issue de la recherche à une micro-échelle, offrant tant des informations spatiales et temporelles, que des informations d'attribut, la résolution spectrale restreint son applicabilité dans la géomorphologie fluviale.

Dans la **Figure II.13** on note comment une même échelle de découpage (un secteur fluvial) peut apparaître plus détaillée ou plus synthétique en fonction de la résolution à laquelle elle est représentée. A haute résolution, la rivière principale apparaît à l'échelle du secteur du bassin, avec tous ses affluents, permettant ainsi l'analyse du tronçon ou de l'affluent (*médaillon A sur la Figure II.12*). Les situations représentées dans les *médaillons B* et *C* montrent le même secteur fluvial qui ne bénéficie plus du même niveau de détail, l'échelle du tronçon ou des affluents étant de plus en plus difficile à atteindre. Tous ces échelles imbriquées diffèrent en fonction de la source de l'image utilisée pour représenter le réseau hydrographique, tandis que la longueur du secteur reste la même. D'où également la possibilité ou l'impossibilité d'effectuer certaines analyses, même si l'échelle initialement prévue pour effectuer le découpage le permettait *a priori*.

Dans la plupart des cas, l'information obtenue des produits satellitaires et d'autre types de produits des méso- et macro-échelles peut seulement aider au calcul de certains indices hydromorphologiques, comme la largeur et la longueur du lit, le type du lit, la sinuosité, la structure des méandres et le degré d'anastomose. Certains auteurs, néanmoins, font aussi la preuve de l'utilisation des images satellitaires (ou des produits dérivés, comme le modelé numérique altitudinal) pour la description de la dynamique fluviale à travers l'identification des processus liés au transport sédimentaires [Chendeş, 2011 ; Malavoi *et al.*, 2014].





**Figure II.13.** L'importance de l'échelle spatiale choisie dans les analyses cartographiques d'un système fluvial [Kondolf et Piegay, 2003]

- A. Plan topographique (Échelle 1:10.000)
- B. Image satellitaire SPOT panchromatique (résolution de 10 m)
- C. La même image satellitaire SPOT, simplifiée à une résolution de 20 m

Au cours de 30 dernières années, le progrès rapide dans la sphère de la technologie informationnelle s'est manifesté même dans l'étude des systèmes fluviaux, permettant des analyses à des échelles spatiales larges (par exemple celle des bassins versants), en utilisant les outils géomatiques (SIG, télédétection) [Donward, 1995].

## 2.2.2. L'échelle temporelle

Dans la plupart des études de dynamique hydro-sédimentaire, le facteur temps présente un fort intérêt. Le temps reste un élément décisif en ce qui concerne les effets des changements environnementaux sur la variabilité des flux liquides et solides, ainsi que sur la dynamique fluviale [Brigode, 2010]. Afin de présenter les échelles temporelles possibles, souvenons-nous de la **Figure II.10**. Les analyses diachroniques basées sur des séries de données hydrologiques peuvent concerner l'échelle infra-journalière (les crues dont les débits sont mesurés chaque heure ou du moins plusieurs fois par jours), ainsi que l'échelle du siècle (les plus grands fleuves ont des archives de données hydrologiques s'étendant sur plus de 100 ans parfois). Entre ces limites, ce sont les échelles de la variabilité mensuelle, saisonnière, annuelle et multi-annuelle qui jouent dans l'analyse hydrologique.

Comme nous l'avons fait pour la présentation de la problématique des échelles spatiales, nous ne discuterons ici que des idées qui appartiennent à un groupe d'échelles ou à des domaines de recherche connexes à l'hydrologie.

### 2.2.2.1. L'échelle du temps : des années aux décennies

Parce que la plupart des études dans la géomorphologie fluviale appliquée (sur le terrain et dans le laboratoire, en contact direct avec les processus et les formes spécifiques) s'étendent sur des périodes de maximum 5 ans, la seule possibilité d'illustrer la variabilité temporelle des flux hydromorphologiques à moyen et long terme reste l'emploi de l'analyse historique et de la statistique. La connaissance du comportement du système fluvial dans les conditions de son passé, différentes par rapport au présent, peut

servir dans l'analyse de la dynamique hydromorphologique actuelle et future, dans le contexte des facteurs anthropiques avec une modélisation des impacts comme les changements dans l'utilisation des terres, l'artificialisation des cours d'eau et les travaux hydrotechniques [Peiry, 1990; Schmitt *et al.*, 2000; Chapuis, 2012]. Par conséquent, l'information historique va servir à la datation des dépôts fluviaux et à établir la trajectoire des changements intervenus dans la dynamique des formes et des processus hydromorphologiques. Par la compréhension de l'évolution du chenal fluvial nous pouvons interpréter les conditions actuelles [Knox, 1977; Trimble, 1998].

L'analyse de la dynamique fluviale à l'échelle de plusieurs années (voir décennies) se base sur l'information provenant de diverses sources. Les plus importantes sont les informations topographiques (des profils longitudinaux, transversaux, des cartes et des plans topographiques) et plus récemment les photographies aériennes qui permettent des analyses diachroniques.

Deux catégories d'informations peuvent être décelées des documents historiques. La première se réfère aux observations sur les phénomènes fluviaux *per se*, comme les mesures de la largeur du chenal d'écoulement, associés aux mesures sur les terrains avoisinants et aux conditions d'écoulement, les observations sur l'occurrence et l'impact des crues, les informations sur l'environnement riverain et sur les caractéristiques du bassin versant, dans des diverses époques historiques [Kondolf et Piegay, 2003]. Deuxièmement, il s'agit des évidences portant sur les phénomènes liés à la dynamique fluviale : des rapports sur les conflits générés par la migration du chenal d'écoulement affectant le droit de propriété sur les terrains adjacents ; les recensements réalisés par l'Etat et les rapports nationaux. Parfois, même les informations « non-fluviales » sont nécessaires pour interpréter les changements intervenus dans le système hydromorphologique : où, quand et pendant quelle période est-ce-que les changements affectant la dynamique fluviale se sont produits ? [Wolman et Gerson, 1978; Bradley et Jones, 1992; Sima, 2011].

#### ***2.2.2.2. L'archéologie fluviale à travers les échelles : des jours aux siècles***

L'archéologie fluviale illustre la connexion entre les activités industrielles et les éléments composants des dépôts fluviaux [Kondolf et Piegay, 2003]. Dans notre cas, le carbone provenant des minéraux de charbon, ainsi que les minéraux associés dans des quantités plus réduites, peuvent être identifiés dans des quantités et des phases de dégradation différentes dans les sédiments du lit de la rivière Jiu et de ses affluents.

Une particularité du bassin versant de la rivière Jiu est l'exploitation du charbon, qui se reflète dans la réponse fluviale, à une échelle variant de la saison jusqu'aux plusieurs décennies. L'intervention du charbon comme traceur hydro-sédimentaire se fait soit par l'emplacement et le maintien déficitaire des dépôts de résidus miniers, soit par les connexions hydrauliques et hydromorphologiques entre les bassins d'extraction du charbon (qui coïncident largement avec les zones de formation des sédiments) et le système fluvial (coïncidant généralement avec les zones de transfert et de stockage intermédiaire des sédiments). A partir de ces caractéristiques, nous considérons qu'une direction méthodologique utile dans l'analyse de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant du Jiu est représentée par l'étude de la teneur en charbon des sédiments, charbon provenant du lignite ou de la houille. Dans ce sens, les analyses géochimiques des successions sédimentaires dans le lit mineur et la plaine d'inondation pourraient contribuer à la détermination du teneur en charbon retenu pendant des diverses périodes de l'écoulement [Houbrechts *et al.*, 2011]. Des résultats similaires ont résulté des études réalisées dans des bassins d'exploitation d'autres

types de minéraux, comme l'or [James, 1989; Sima, 2011], le fer [Petit, 1995; Sluse et Petit, 1998; Houbrechts *et al.*, 2011], ou le plomb [Hudson-Edwards *et al.*, 1999]. Les mots-clefs dans la plupart de ces études ont été le temps de résidence dans le stock sédimentaire des minéraux, la relation entre la magnitude/la fréquence des crues et la quantité de minéraux contenue par les sédiments, ainsi que les conditions hydraulique et géomorphologiques de forcing de cette interaction entre les minéraux et les composantes principales du système fluvial (l'eau et les sédiments) – Howard et Macklin (1999).

D'une autre côté, parce que les facteurs anthropiques qui ont influencé le transport et le stockage sédimentaires n'ont pas été constants dans le temps et dans l'espace (des défrichages et reforestations, le changement du régime agricole d'utilisation des terres, l'intensité de l'activité industrielle d'exploitation du charbon, qui s'est réduite après 1989), l'interprétation de la dynamique des sédiments contenant une fraction de charbon devrait prendre en considération la nature anthropique de cette dynamique fluviale, à l'échelle temporelle et aussi spatiale.

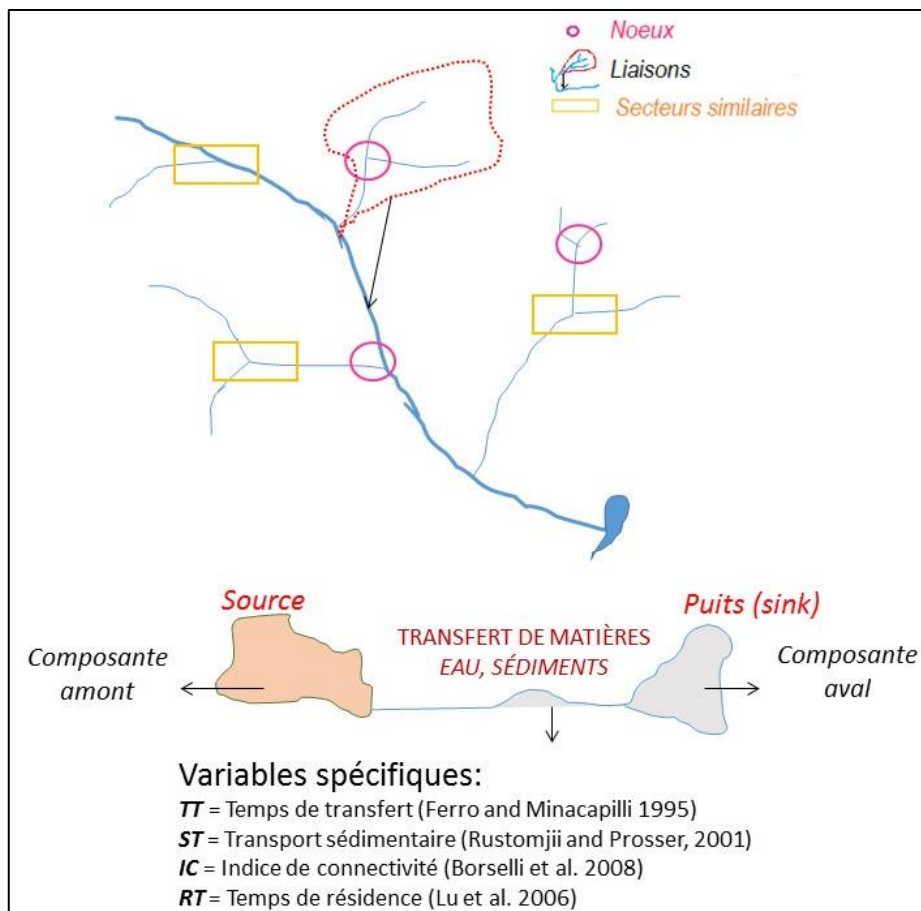
En ce qui concerne l'archéologie fluviale, deux aspects importants devraient être retenus [Petit et Houbrechts, 2003]. Premièrement, des informations détaillées sur l'exploitation des minéraux sont disponibles seulement pour des certains secteurs des bassins versants ou pour des secteurs des rivières, conduisant à des incertitudes concernant la représentativité desdites données (comme dans le cas du manque d'homogénéité spatiale et temporelle des données portant sur l'exploitation du charbon dans le bassin du Jiu et sur la dynamique de l'usage des terres). Deuxièmement, il y a parfois des problèmes causés par les changements survenus dans la manière dans laquelle s'assure l'évidence des informations, les observations se font, les mesures se réalisent ou des procédures techniques s'appliquent pour le rassemblement des informations [Bradley et Jones, 1992].

### ***2.3. La connectivité dans un système fluvial : une notion qui lie tout ?***

L'analyse de la connectivité hydromorphologique implique l'identification des connexions entre les composantes et les flux d'un système fluvial, afin d'évaluer la sensibilité des composantes de petite échelle (par exemple un secteur avec des problèmes d'érosion ou de dépôt), aux changements au niveau des composantes à grande échelle (par exemple les conditions d'érosion sur les versants en amont). La comparaison ne vise pas les attributs des composantes du système fluvial analysé à une certaine échelle, mais les changements qui peuvent affecter ces composantes, en fonction desquels on peut déterminer les facteurs et leur chronologie [Borselli *et al.*, 2008]. En même temps, les études de connectivité peuvent intégrer l'analyse de la connexion entre le bassin versant et un secteur de rivière [Kirby et White, 1994], et sont généralement focalisées sur les relations entre les unités ou les composantes morphologiques du système (entre les sous-bassins hydrographiques, les secteurs de lit d'une rivière etc.).

La majorité des études hydromorphologiques impliquent aussi une approche diachronique [Amoros et Bravard, 1985], orientée vers l'évaluation des changements subis à travers le temps par une seule composante du système, afin d'identifier les causes qui peuvent générer les changements actuels et futurs. Les analyses diachroniques peuvent aussi déterminer les ajustements hydromorphologiques et le temps de réaction du système auxdits ajustements, principalement en ce qui concerne la relation du système avec l'usage des terres ou d'autres variables indépendantes. La combinaison de ces analyses peut présenter de la relevance dans les tentatives de répondre aux questions posées par la gestion des bassins versants

[Houbrechts et Petit, 2011]. Ainsi, les analyses de similarité et de connectivité constituent deux voies pour étudier le système fluvial d'une manière comparative, la première centrée sur les composantes du système vues à une seule échelle (temporelle ou spatiale) et la deuxième axée sur les connexions entre les composantes du système à des différentes échelles (**Figure II.14**).



**Figure II.14.** Schéma de base d'une analyse de connectivité [d'après Kondolf et Piegay, 2003; Borselli et al., 2008]

Les hypothèses de la recherche, la dimension et l'hétérogénéité de la zone étudiée et les causes des changements analysés représentent des facteurs de décision pour l'approche (l'utilisation de la similarité, la connectivité ou une combinaison entre les deux). Indifféremment de l'approche proposée, les analyses de similarité sont incluses dans la connectivité et peuvent être réalisées à toute échelle spatiale [Ferguson, 1986 ; Liebault et al., 1999 ; Brierley et Fryirs, 2000].

L'analyse de la connectivité découle du concept d'« hydrosystème », qui suppose que les attributs d'une composante hydromorphologique résultent à la suite de plusieurs ajustements avec des effets « en cascade » sur les autres attributs. Le but principal de ces analyses est d'illustrer les facteurs de causalité qui agissent en cascade et déterminent les changements observés, ainsi que les temps de réaction associés [Borselli et al., 2008]. Dans le premier cas, la composante étudiée se trouve au bout d'un système avec plusieurs niveaux hiérarchiques. Quand les changements affectant un certain niveau hiérarchique sont étudiés et datés, il est possible de les localiser sur l'axe du temps et, ainsi, d'identifier les changements intervenus à des échelles plus grandes, qui expliquent les changements survenus à des échelles plus réduites [Alcayaga, 2013]. Un tel modèle conceptuel évalue la relation entre le système fluvial et le réseau hydrographique par l'intermédiaire de l'intensité et la durée de la transmission des vecteurs de changement vers le sous-système situé en aval, ou du lit vers les bords de la rivière. En revanche, les modèles orientés vers l'analyse des composantes du système offrent des informations beaucoup plus vagues en ce qui

concerne l'échelle temporelle, mais les changements qui génèrent des effets en cascade sur les attributs des composantes sont beaucoup plus clairement modelés [Kondolf *et al.*, 2002].

Des exemples de succès de l'analyse de la connectivité à travers la modélisation orientée vers les composantes ont été proposés par des nombreux auteurs [Bravard *et al.*, 1997; Borselli *et al.*, 2008; Alcayaga, 2013], décrivant, en général, les tendances des systèmes fluviaux suite à l'augmentation de l'érosion longitudinale pendant le XX<sup>ème</sup> siècle, à cause des activités anthropiques (l'extraction des graviers du lit mineur, la construction de barrages).

Ainsi, dans le cas de l'emploi des modèles et des indices de connectivité, l'approche systémique devient encore plus flexible, et peut être tant qualitative (des analyses géomorphologiques dans le but de réaliser la gestion de la rivière) que quantitative (modélisation hydrologique). Le choix de l'échelle spatiale d'analyse dépend néanmoins des données et des méthodes disponibles pour répondre aux questions scientifiques formulées et pour décrire la dynamique hydromorphologique par les méthodes spécifiques à la connectivité et à la similarité dans le système fluvial.

## **2.4. Méthodologie et données**

### **2.4.1. Méthodes et outils utilisés dans l'étude des systèmes fluviaux et de la dynamique hydro-sédimentaire**

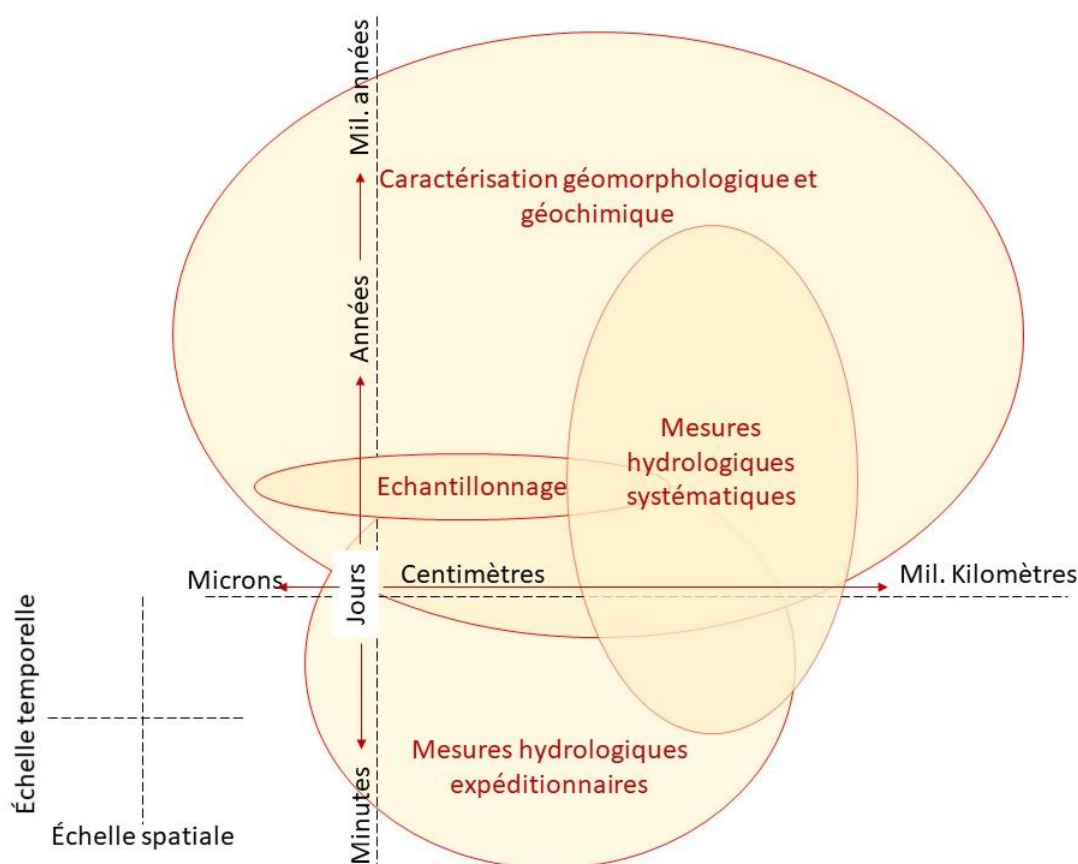
L'obtention des résultats dans l'étude d'un système fluvial dépend moins du choix de la méthode et de l'échelle de travail, mais plutôt de la qualité de la question méthodologique, en tant que moteur de la recherche [Leopold et Langbein]. Après l'énoncé de la question, sur la base d'une approche inductive ou déductive et avec l'appui d'un ensemble de concepts donné, le pas suivant est représenté par la définition des méthodes de travail et des sources potentielles de données. Ultérieurement (ou en même temps), les méthodes et les techniques connexes sont identifiées dans un cadre conceptuel et à une résolution spatio-temporelle adéquate pour l'échelle à laquelle on pose la question [Kondolf et Piegay, 2003]. Quand la rivière est vue comme un système, les questions ne sont pas limitées par le temps et l'échelle et les questions visent généralement les connexions entre les sous-systèmes du bassin versant ou entre les formes et les processus.

Dans le dessein de comprendre les méthodes qui s'imposent dans notre thèse, nous avons étudié la littérature scientifique actuelle pour établir quels outils ont été utilisés afin de répondre aux diverses questions, et à quelles échelles spatiales et temporelles.

Parmi les méthodes employées dans ce domaine multidisciplinaire de la dynamique hydro-sédimentaire, se retrouvent les méthodes de pensée/conception, qui structurent la manière dans laquelle la recherche est réalisée et les méthodes de travail employées dans le processus concret de recherche sur le terrain ou dans le laboratoire, chacun ayant ses techniques spécifiques. Dans la première catégorie, par la méthode de l'induction, les relations empiriques entre les formes fluviales et le régime hydromorphologique ont donné naissance à des nombreuses nouvelles questions scientifiques. Par contraste à l'induction, dans la méthode déductive, le processus de recherche est mené sur la base d'une hypothèse préliminaire, qui pourrait être invalidée en utilisant des tests statistiques traditionnels [Thorne et Thompson, 1995 ; Helsel et Hirsch, 2002]. La méthode de la déduction peut être purement expérimentale, cas dans lequel le chercheur réduit de manière artificielle, tant dans le laboratoire que sur le terrain, le nombre de variables pour tenter



d'établir et valider les connexions de base entre eux. La méthode peut se fonder aussi sur la comparaison des objets dans l'espace, dont leurs conditions existantes sont utilisées pour tester et valider une hypothèse *a priori* (expérience *in natura*), suivi par la sélection des zones et données spécifiques [Wolcott et Church, 1991]. Un exemple dans ce sens est représenté par les problèmes assez fréquemment rencontrés à des échelles spatiales et temporelles plus petites ou plus courtes que celles nécessaires pour comprendre les processus fluviaux impliqués, comme il se passe dans le cas de la dynamique des alluvions en charriage à l'échelle spatiale d'un tronçon ou d'une station hydrométrique, analysée à travers des mesures dédiées (Figure II.15).



**Figure II.15.** Schématisation des échelles spatiales et temporelles comprises par différentes catégories de mesures et analyses hydrologiques, hydro-sédimentaires et géomorphologiques

Les techniques géomorphologiques, comme l'échantillonnage des sédiments et l'évaluation du faciès du lit, peuvent néanmoins offrir des informations précieuses sur la fonctionnalité de l'ensemble du système fluvial et sont appliquées dans la géomorphologie, dans des questions comme la datation des dépôts ou des surfaces ou l'illustration de la variabilité des formes ou des processus [Rice et Church, 1998].

Alternativement, l'expert en hydraulique va appliquer plus rarement des instruments comme la modélisation numérique des processus qui prennent place dans les systèmes fluviaux [Ewen et collab., 2000 ; Haberlandt et Radtke, 2014]. Dans d'autres études, il y a un équilibre entre les méthodes et les techniques spécifiques à la géomorphologie fluviale et celles appartenant à l'ingénierie hydraulique : la simulation numérique de la largeur et des tresses d'une rivière, la micromécanique du transport dans le lit et la prévision de la vitesse de distribution des flux de matière solide et liquide dans le lit [Allen, 1985 ; Belleudy et Lefort, 2001 ; Jégou et Belleudy, 2002 ; Chapuis, 2012].

Les géographes tendent, à leur tour, de se concentrer sur la comparaison des formes des processus fluviaux, en fonction des caractéristiques du bassin ou de la région bioclimatique dans laquelle il se trouve,

l'influence des activités humaines, la végétation ou les conditions géologiques qui contribuent au changement de l'équilibre hydromorphologique des rivières. Des travaux récents parus dans *Geomorphology* et *Earth Surface Processes and Landforms* ont reflété, dans la sphère de la géomorphologie fluviale, le mélange des approches géographiques avec la télédétection [Bryant et Gilvear, 1999], les perspectives historiques [Brooks et Brierley, 1997 ; Leys et Werrity, 1999 ; Liebault et Piegay, 2002] et l'analyse de la complexité longitudinale ou inter-systémique [Petit et Pauquet, 1997 ; Walling et He, 1998 ; Madej, 1999].

Nous pouvons aussi faire un pas en arrière et arriver à un cadre conceptuel ou à des modèles méthodologiques plus larges, capables de diriger notre recherche : le concept du système fluvial [Schumm, 1977], le concept d'hydrosystème [Roux, 1982] ou celui du budget des sédiments [Dietrich et Dunne, 1978]. Dans la plupart des cas, il n'y a pas des outils parfaits pour répondre à notre question. En revanche, nous devons appliquer un ensemble de méthodes (parfois variées) pour aborder une question.

En ce qui concerne les méthodes de la pensée (« *thought methods* »), des outils employés dans l'étude des systèmes fluviaux et fondés en bonne partie sur des mesures sur le terrain et dans le laboratoire, elles tendent à entrer dans deux catégories. Les études sur les processus des lits utilisent plutôt la vitesse, la profondeur, le débit et les sédiments en suspension, les échantillons de sédiments ou l'analyse de la mobilité des particules en charriage ou en suspension. Les études de modélisation des lits employant deux sous-ensembles d'outils. Le premier fait appel aux formules hydrauliques, aux modèles statistiques bi-variables, à l'analyse de la cartographie aérienne (pour mesurer la sinuosité et d'autres descripteurs des modèles hydromorphologiques) et la cartographie géomorphologique.

Le deuxième se fonde sur des outils/instruments pour l'analyse spatiale [Bryant et Gilvear, 1999 ; Ewen *et al.*, 2000]. Au niveau d'un système complexe, comme un système fluvial, elles sont employées plutôt d'une manière combinée, comme par exemple le modèle digital de l'altitude (DEM en anglais), les systèmes géo-informatiques (SIG), les images satellitaires, en combinaison avec l'analyse des documents, comme les cartes géologiques ou topographiques et les photographies aériennes, et aussi avec les analyses multi-variables.

Enfin et surtout, les instruments et les méthodes spécifiques à la géologie de surface ont un rôle déterminant dans la géomorphologie fluviale. La géochimie, la géochronologie, la pédologie et la stratigraphie peuvent augmenter l'horizon de la connaissance de la dynamique hydro-sédimentaire et, en même temps, ouvrir la voie pour une meilleure compréhension du comportement futur d'un système fluvial. La chronique des changements géomorphologiques liée aux caractéristiques physiques et chimiques des alluvions, bien qu'elle ne puisse pas être complètement élucidée, constitue une preuve de la dynamique du système fluvial dans son passé, sous l'influence des divers facteurs environnementaux [Baker, 1973]. Ainsi, la compréhension du « comportement fluvial » dans le passé peut constituer un fondement solide pour l'évaluation de l'état fluvial actuel et pour faire des prévisions, afin de d'établir des plans de restauration fluviale [Coleman et Smart, 2011 ; Schrott, 2015]. Les préoccupations de la société concernant la gestion des inondations et les effets potentiels du changement climatique doivent donc être associées à la connaissance et à une gestion appropriée des processus de sédimentation fluviale et du comportement dynamique des cours d'eau.

En synthèse, tout en s'intéressant à l'étude hydro-sédimentaire systémique du bassin versant de la Jiu, la thèse elle-même cherche à analyser la dynamique hydro-sédimentaire par l'utilisation de méthodes situées à la croisée des quatre domaines de recherche :

- **Hydrologie** – afin de comprendre la variabilité spatio-temporelle des paramètres hydrologiques, à partir des mesures des débits liquides et d'alluvions en suspension et des concentrations des matières en suspension (MES) réalisées dans le cadre du réseau hydrométrique appartenant à l'Administration Nationale des Eaux Roumaines (ANAR);

- **Hydrogéomorphologie** - pour l'analyse de la dynamique fluviale et l'évaluation du degré de connectivité entre les zones amont de production des sédiments, les secteurs aval, de dépôt et de transfert.

- **Géographie** – pour l'analyse des relations entre la dynamique hydro-sédimentaire et les facteurs géographiques naturels et anthropiques qui les contrôlent.

- **Géochimie** – pour identifier des méthodes adaptées en ce qui concerne le traçage sédimentaire amont - aval des zones de production et de transfert des alluvions.

L'approche méthodologique que nous avons employée se développe au fur et à mesure que nous faisons connaissance avec le fonctionnement du bassin de la rivière Jiu (caractéristiques et processus de production, échelles spatio-temporelles de transfert des sédiments). De la sorte, nous avons adopté une démarche qui va du général (échelle du bassin versant entier, période d'analyse des années) au particulier (l'échelle spatio-temporelle plus fine de la crue).

## 2.4.2. Données

L'adoption d'une des méthodes possibles pour accomplir les objectifs de la recherche commence toujours avec la manière dans laquelle nous les percevons et les distinguons par rapport aux instruments, concepts et techniques. A notre soutien, nous considérons le dictionnaire *Webster*, qui définit l'instrument d'analyse comme tout objet utilisé pour accomplir une tâche ou un objectif [[Random House, 1996](#)]. Par l'instrument, dans un sens plus large, nous comprenons aussi les concepts, les théories, les méthodes et les techniques. Par conséquent, avant de se décider sur la méthode, il est important d'établir la liste des instruments de travail, selon les objectifs proposés.

De plus, les concepts, les méthodes et les techniques employées ont été organisées en fonction des sujets-clef/les questions de la recherche.

La démarche scientifique envisagée à la réalisation de la thèse satisfait tant la nécessité pratique de connaître les facteurs contribuant aux mécanismes de formation et de transfert des flux liquides et solides dans le bassin versant du Jiu, que la nécessité théorique, retrouvée dans l'application de la théorie du système fluvial et dans les analyses à des diverses échelles spatiales et temporelles.

Dans le sens que nous utilisons ici, les concepts seront des représentations mentales de la réalité, et l'approche systémique sera une formulation explicite des relations entre les concepts. Les deux peuvent être considérées comme des outils/des instruments scientifiques, parce qu'elles offrent le cadre dans lequel on approche les problèmes et on applique les méthodes et les techniques. A cause du fait que les théories scientifiques peuvent être des éléments importants dans les méthodes scientifiques [[Brown, 1996](#)], elles pourraient aussi être considérées comme des outils. Une méthode implique une approche, un ensemble d'étapes qui doivent être suivies afin de résoudre un problème, et qui implique parfois plusieurs techniques.



Comme il est suggéré dans le dictionnaire Webster [Random House, 1996], il s'agit d'une procédure ou d'un processus ordonné, une voie habituelle ou une manière de faire quelque chose. Les techniques sont les outils les plus spécifiques et concrets, parce qu'elles se réfèrent à des actions claires d'où résultent des mesurages, des observations ou des analyses.

Afin d'accomplir les objectifs de la thèse, nous feront appel à une série de méthodes groupées autour de plusieurs catégories de données ont été utilisées, provenant de différentes sources (bibliographiques, bases de données statistiques et spatiales, conventionnelles ou digitales, des mesures ou des observations sur le terrain etc.). Celles-ci sont synthétisés dans le **Tableau II.1** :

**Tableau II.1.** Catégories de données nécessaires à l'étude

Catégorie générale	Type de donnée
Données hydrologiques	Débits liquides moyennes journalières et mensuels
	Débits liquides maximaux journalières et mensuels
	Débits horaires durant quelques crues majeures (infra journalier / avant 2010)
	Débits d'alluvions en suspension journaliers et mensuels (2001-2010 / 22 stations)
Données pluviométriques	Moyens journaliers type GRID des valeurs interpolées entre les stations météorologiques (1961-2013)
Relevées topographiques	Courbe de tarage et profils en travers à s.h. Podari sur la rivière Jiu
Caractéristiques géographiques du bassin versant	Carte lithologique, hydrogéologique, topographique, pédologique (en format raster et/ ou vecteur), Photographies aériennes et plans topographiques
Données Hydrologiques	Débit solide en charriage
Altérations hydro-morphologiques	Cartes ou documents attestant des interventions dans le lit des rivières et des altérations hydro-morphologiques associées

En ce qui concerne la démarche scientifique, les méthodes et les techniques envisagées se retrouvent dans la succession des étapes parcourues afin de réaliser le contenu de la thèse et l'identification des réponses aux questions opérationnelles formulées.

## Chapitre 3.

### Caractérisation de la zone d'étude : le bassin versant de la rivière Jiu

<b>3.1. L'état de connaissance de la zone d'étude.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.1. Etat de l'art sur le relief et la géologie.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2. Etat d'art sur les aspects climatiques.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3. Etat d'art sur les problèmes d'hydrologie et d'hydrographie.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2. Repères de localisation.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3. Le substrat géologique.....</b>	<b>49</b>
<b>3.4. Les unités morphologiques .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.1. Les unités morphologiques.....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.2. Le secteur montagneux.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.3. Le secteur subcarpatique.....</b>	<b>61</b>
<b>3.4.4. Le plateau de Mehedinți.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4.5. Le Piémont Gétique.....</b>	<b>63</b>
<b>3.4.6. Le secteur de plaine.....</b>	<b>64</b>
<b>3.5. Particularités climatiques.....</b>	<b>64</b>
<b>3.5.1. Données et méthodes.....</b>	<b>65</b>
<b>3.5.2. Variabilité de la température de l'air.....</b>	<b>66</b>
3.5.2.1. Variabilité de la température à l'échelle multiannuelle.....	66
3.5.2.2. Régime annuel des températures de l'air.....	70
<b>3.5.3. Variabilité des précipitations.....</b>	<b>71</b>
3.5.3.1. Quantités annuelles et mensuelles des précipitations.....	71
3.5.3.2. Précipitations maximales mensuelles.....	72
3.5.3.3. Analyse pluviométrique selon le critère de Hellmann.....	74
3.5.3.4. L'indice standardisé des précipitations.....	75
3.5.3.5. L'indice de pluie extrême .....	77
<b>3.5.4. Diagramme climatique de Péguy.....</b>	<b>79</b>
<b>3.6. Un bassin avec des caractéristiques hydrographiques complexes.....</b>	<b>81</b>

3.6.1. <i>Les sous-bassins et leur réseau hydrographique</i> .....	81
3.6.2. <i>Le réseau de drainage : la densité et la hiérarchisation</i> .....	89
<b>3.7. Les sols et leur importance hydrologique</b> .....	95
3.7.1. <i>La classification génétique des sols</i> .....	95
3.7.2. <i>Les groupes hydrologiques des sols</i> .....	98
<b>3.8. La couverture et l'utilisation du sol</b> .....	100
<b>3.9. Pressions anthropiques sur les flux hydro-sédimentaires</b> .....	107
3.9.1. <i>L'exploitation du charbon</i> .....	108
3.9.2. <i>Les aménagements hydrotechniques</i> .....	113
3.9.3. <i>Les changements dans la couverture forestière</i> .....	115
3.9.3.1. <i>Considérations générales</i> .....	115
3.9.3.2. <i>Où chercher la relation couverture forestière – flux hydro-sédimentaire ?</i> .....	116
3.9.3.3. <i>La méthodologie suivie</i> .....	117
3.9.3.4. <i>Relations entre les changements dans la couverture forestière (2000 – 2012) et la dynamique hydro-sédimentaire</i> .....	118
3.9.4. <i>L'extraction des granulats des lits des rivières</i> .....	119
<b>Synthèse du chapitre</b> .....	121

## 3.1. L'état de connaissance de la zone d'étude

### 3.1.1. Etat de l'art sur le relief et la géologie

Loin d'être un sujet de recherche intensément débattu sur le plan national, l'espace correspondant au bassin versant de Jiu a été mentionné, avec ses particularités géographiques dans un nombre relativement réduit d'études de spécialité. Parmi eux, nous notons premièrement les travaux de synthèse à l'échelle régionale et nationale portant sur des aspects géographiques et géomorphologiques [*Geografia României, vol III et IV, du 1987 et 1992, Les Unités de relief de la Roumanie, Vol I et IV, du 2001 et 2010*, ou les travaux de *Velcea, V. (1982, 2002), Posea (1974), Ielenicz M. (1996, 2003, 2005), Pătru et al., (2006)*].

Importants pour la connaissance du cadre géographique du bassin de Jiu sont les contributions de plusieurs auteurs qui ont analysé l'espace de NV de l'Olténie (les collines de Coșuștea, le plateau de Mehedinți, la dépression Târgu Jiu – Câmpu Mare, les Subcarpathes de Gorj, la dépression de Petroșani, les montagnes de Retezat et Parâng) : *de Martonne (1873 – 1955), Răileanu (1952), Tufescu et Mocanu (1964), Roșu (1967, 1973), Geanana (1973, 2004), Popescu (1982), Șchiopoiu (1982), Urdea (1989), Badea et collab. (1992), Tomescu (2004 a,b), Toșa – Turdeanu (1975), Săndulache (2009), Ionuș (2011)*.

Les particularités hydrologiques de la rivière Jiu et de ses affluents ont constitué sujets d'intérêt pour quelques travaux à l'échelle régionale et nationale, dont nous mentionnons ceux réalisés par : *de Martonne (1899, 1901)*, sur la crue de (1900) sur le Jiu ; *Ujvari (1972)*, qui a laissé une monographie exhaustive des rivières en Roumanie; *Zăvoianu (1978, 1999)*, portant sur l'hydrologie et la morphométrie des bassins versants ; le collectif d'auteurs *Liteanu et Miță (1986)*, qui ont étudié les phénomènes de gel et la température des eaux des rivières ; *Mustățea (1996, 2005)*, qui a étudié les crues en Roumanie ; *Ionuș (2011, 2014)*, avec ses travaux sur le potentiel géo-écologique des eaux de surface dans le bassin versant de la rivière Motru et les méandres de Jiu dans son cours inférieur ; ou *Savin*, avec ses contributions très importantes à l'étude des rivières de l'Olténie (1990, 2003, 2008).

Des travaux de synthèse hydrologique englobant l'espace hydrographique du bassin du Jiu ont été aussi réalisés par de diverses collectives de chercheurs qui analysé aussi les caractéristiques hydrologiques et morphométriques, que des aspects géomorphologie fluviale : *Ichim et collab. (1989), Șerban et collab. (1989) ; Rădoane et Rădoane (2007)*. D'autres contributions sont parties sur des sous-bassins composants du bassin versant du Jiu: le bassin de Gilort – *Marinescu (2007)*, le bassin de la rivière Coșuștea, affluent de second ordre de la Jiu – *Moroșanu (2014, 2016 a,b)*, le bassin supérieur du Jiu (2016), le bassin du Motru Sec – *Rotaru (2009), Grecu et collab. (2012)*.

Les recherches visant la vallée de la rivière Jiu ne se sont pas limitées à des synthèses hydrologiques régionales ou nationales, avec des références passagères à la Jiu et ses affluents, mais, au niveau du XX<sup>ème</sup> siècle, quelques études concernant strictement la vallée de la Jiu, sont apparues : *Badea (1971), Preda et Pasere (1985), Savin (1990, 2005), Dumitrescu et collab. (2006)*. De plus, des références à l'espace hydrographique et géographique du bassin versant et de la rivière Jiu se trouvent dans des monographies et rapports scientifiques de divers établissements dans le domaine : *IMH (1971), Aquaproiect (2012), ANAR (2014, 2015), ABA Jiu (2016), Fundația pentru Parteneriat (2007)*.

Des informations géographiques (y compris hydrologiques) sur la région d'étude peuvent être trouvées aussi dans les monographies des départements de la Roumanie au niveau desquels le bassin de la

rivière Jiu s'étale : *Dolj* – Badea et Ghenovici (1974), Bărbăcioru, (1981); *Gorj* – Baranovsky et Neamu (1971), Harisiad *et collab.* (1980); *Mehedinți* – Cucu et Cucu (1980), Catrina *et collab.*, (1981); *Hunedoara* - Gruescu et Grumazescu (1970), Mîrza *et collab.*, (1980), Mariciuc (2007). Dans ces monographies, les caractéristiques physiques et socio-économiques des départements sont analysées.

Les particularités hydrogéologiques ont été étudiées dans quelques travaux à différentes échelles spatiales : *les caractéristiques de eaux minérales dans le sud de la Roumanie* [\*\*\*, 1970; Palcu *et collab.*, 2008]; *l'hydrogéologie de la région située entre les rivières Motru et Jiu, portant surtout sur les gisements de charbon* [Androhovici et Iordache, 1994]; *les problèmes d'hydrogéologie dans le karst roumain* [Orășanu et Iurkiewicz, 2010] ; *des synthèses de géologie, hydrogéologie et géochimie* [Preda et Maroși, 1971; Mutihac et Ionesi, 1973; Trufaș et Trufaș, 1975; Cineti, 1990], ou des travaux sur la géologie, l'hydrogéologie et les propriétés des structures souterraines riches en charbon [Răileanu *et colab.*, 1963].

La problématique liée au charbon de la présente thèse doctorale et, par conséquent, une grande partie de l'approche méthodologique, s'appuient, d'une manière importante, sur les travaux scientifiques de l'ancien Institut de Mines, actuellement devenu l'Université de Mines de Petroșani, dont les chercheurs ont étudié les ressources de charbon de la vallée de la Jiu et, ultérieurement, l'influence des activités d'exploitations du charbon sur l'environnement et, plus particulièrement, sur la qualité des eaux de surface. Parmi les sujets abordés, l'impact des exploitations du charbon a été au cœur des recherches dans le bassin de la rivière Jiu, afin de connaître la gestion des anciennes et actuelles mines et carrières de charbon, leur influence sur la qualité des rivières et sur la production sédimentaire, en particulier les alluvions chargées de charbon [Ionică, 2004 ; Fodor, 2006 ; Traistă et Ionică, 2006 ; Irimia *et collab.*, 2011 ; Lazăr, 2015]. Fodor (2006), Haneș (2006), Călinoiu *et collab.* (2010); Moldovan *et collab.* (2013). De plus, importantes pour établir et maintenir la qualité des gisements de charbon, ont été aussi les effets de la subsidence provoquée par l'amincissement des couches de charbon au fur et à mesure de leur exploitation en souterrain [Ortelecan, 1997; Marian et Onica, 2012]. Les dernières années, après la finalisation de plusieurs études portant sur la pollution dans les bassins miniers, l'accent a été mis de plus en plus sur la problématique de la réhabilitation des dépôts de résidus et sur le développement durable des deux bassins miniers [Fodor *et Lazăr*, 2006 ; Băraiac, 2011 ; Bergheș, 2012; Brașovan, 2012].

D'autres études ont porté sur la perception des habitants et des institutions affectées par la pollution causée par l'industrie du charbon dans le bassin Motru-Rovinari [Barbat *et collab.*, 2012], les changements dans la planification des zones rurales après le développement de l'industrie du charbon dans le département de Gorj [Braghină *et collab.*, 2008] ou l'axe urbaine de la dépression de Petroșani [Costin, 2012], la dynamique des indicateurs techniques et économiques de l'industrie minière dans la vallée du Jiu [Cozma *et collab.*, 2010; Buia *et collab.*, 2013; Mihailescu *et collab.*, 2013]. Le développement de l'industrie minière en tant qu'activité économique dominante dans le bassin versant du Jiu a suscité une attention particulière à l'impact environnemental et aux types de pollution induits par l'exploitation du charbon [Bădulescu et Sârbu, 2006 ; Drăghici, 2006],

La connaissance du potentiel exploitable des ressources de charbon du bassin de la rivière Jiu et des possibles influences sur l'environnement a été créée sur la base de nombreuses contributions portant sur la description des caractéristiques géographiques et géologiques des bassins carbonifères : Răileanu

(1952) ; Mateescu (1962) ; Catan-Rusta (1991) ; Pop (1993) ; Nistor (2002, 2007, 2011), Fodor (2003) ; Buliga (2009) ; Călin et collab. (2010) ; Cuculici (2015) ; Lazăr (2015).

Informations sur les impacts anthropiques sur les caractéristiques hydrologiques et hydromorphologiques dans le bassin de la rivière Jiu se trouvent dans quelques travaux : Bălă (1979), Hidroelectrica (2000), Uscătescu (2013). Une attention particulière a été accordée aux effets sur les processus d'érosion et de transport dans les lits des principales rivières du bassin Jiu, tels que signalés dans les documentations d'établissement des gravières, réalisées par Aquaseverin pour l'implémentation des projets d'extraction des graviers du lit de la rivière Jiu dans les secteurs de Mofleni, Cernele, Ișalnița, Podari etc. Ces documents, en dehors des informations morphométriques et hydrologiques à des échelles de moins d'un kilomètre, renforcent les hypothèses de la présente recherche concernant le rôle du charbon contenu par les alluvions dans le traçage de la dynamique hydromorphologique des rivières du bassin versant de la rivière Jiu.

Dans le présent travail, nous vérifierons ces pistes concernant le lien entre les activités d'exploitation du charbon et la composition chimique des sédiments des rivières.

### 3.1.2. Etat d'art sur les aspects climatiques

Les caractéristiques climatique, agro-climatique et bioclimatique de la région d'Olténie et, implicitement, du bassin hydrographique de la rivière Jiu; a été abordé par plusieurs auteurs: Badea (1971); Ujvari (1972); Neamu (1998); Dumitrașcu (2006); Bogdan et Marinică (2007); ANM (2008); Ionac et Ciulache (2008); Vlăduț (2006), Povară (2004); Badea et collab., (2001, 2010); Dumitrașcu (2006).

L'activité scientifique des dernières décennies dans le domaine de la climatologie roumaine a mis en évidence une série de traits climatiques généraux de la région étudiée, la plupart des travaux visant les phénomènes climatiques extrêmes [Marinică, 2003; Marinică, 2006; Bogdan et Marinică, 2007; Marinică, 2015; Onțel et Vlăduț, 2015], ou l'influence du climat sur les cultures agricoles, les transports, le potentiel bioclimatique et ainsi de suite [Ionac et Ciulache, 2008].

En outre, au cours des dernières décennies, une série de travaux de synthèse, portant sur le climat de la région (y compris des données statistiques sur les paramètres météorologiques de la plupart des stations dans le bassin de Jiu), ont été publiés [ANM, 2008, Bogdan et Marinică, 2007; Marinică, 2003] sont également disponibles. Il convient également de souligner la préoccupation récente de certains chercheurs d'analyser les changements climatiques qui ont eu lieu à Olténie, la variabilité des précipitations ainsi que la fréquence des années pluvieuses et sèches [Marinică, 2006; Vlăduț, 2004; Vlăduț, 2006; Sandu et collab., 2012; Onțel et Moroșanu, 2013; Vlăduț et Onțel, 2013, Constantin et al., 2015; Marinică et al., 2015].

Des analyses visant particulièrement le bassin de la rivière Jiu ont été menées par Constantin Savin. Dans le premier travail dans le domaine climatique [Savin, 1994a], Savin fait une analyse de la variabilité dans l'évolution de la température de l'air et des précipitations en Olténie, prenant comme étude de cas ces paramètres climatiques durant les étés des années 1992 et 1993. La même année, il réussit de mettre en évidence la relation entre les valeurs exceptionnelles de principaux paramètres météorologiques et les débits des rivières, surtout la sécheresse [Savin, 1994b ; Savin, 1994c]. Dans les années qui viennent, il continue ce travail à l'interface entre la météorologie et la climatologie et se concentre autour du phénomène de sécheresse, en se demandant même si le climat de la région de l'Olténie est en cours de s'aridiser et quel

impact aurait-il sur les tendances dans l'écoulement minimal des rivières dans l'espace hydrographique Jiu – Danube [Savin, 1995 ; Savin 1996a ; Savin, 1996b]. En ce qui concerne la relation entre l'évaporation – les précipitations et l'écoulement, il convient de mentionner les travaux de *Constantin Savin (2003, 2004 et 2008)*. et la modélisation de l'évapotranspiration dans le bassin de la rivière Jiu, estimée par différentes méthodes statistiques [Moroşanu, 2016].

Généralement, le climat du bassin de la rivière Jiu est caractérisé par des étés chauds, avec précipitations assez faibles, qui prennent la forme de pluies, et des hivers doux et humides, avec des réchauffements fréquents causés par des masses d'air méditerranéen [Marinică, 2003]. Le territoire du bassin de la rivière Jiu s'encadre dans le climat tempéré-continentale, et sa localisation dans le S-O du pays favorise la présence des influences méditerranéens.

### 3.1.3. Etat d'art sur les problèmes d'hydrologie et d'hydrographie

La rivière Jiu a longtemps fait l'objet d'études pour de plusieurs recherches dans le domaine des sciences de la Terre.

Jusqu'à la mise en place d'un réseau de stations hydrométriques, il n'était pas possible, du point de vue hydrologique, de réaliser des études pertinentes sur les flux liquides dans le bassin de la rivière Jiu. Comme la plupart des stations hydrométriques a été installées dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle, les études sur les caractéristiques hydrologiques des rivières du bassin de Jiu ont été menées notamment à partir de la seconde moitié du siècle dernier. Parmi les premières informations liées aux particularités hydrologiques dans le bassin de la rivière Jiu, il y a celles des travaux du géographe français E. de Martonne, portant sur les inondations du mois d'août 1900 [de Martonne, 1901].

Au fil du temps, le bassin de la rivière Jiu a été inclus dans plusieurs études hydrologiques à l'échelle régionale et nationale, ayant une place privilégiée parmi les rivières du sud de la Roumanie, en tant que principal affluent du Danube. Parmi ces études, nous citons celles réalisées par *Tiberiu Morariu (1955)* et l'équipe formée par *Morariu, Savu et Dumbavă (1956)*, portant sur l'ouest de la dépression de Petroşani (secteur supérieur du bassin de la rivière Jiu), et l'analyse de la densité du réseau hydrographique de tous les bassins de la Roumanie.

Alexandru Roşu a étudié la morphologie de la zone de confluence entre la rivière Jiu et ses principaux affluents, Motru et Gilort (1956), la tectonique récente dans le bassin de la rivière Jiu dans son secteur Subcarpatique [Roşu, 1961], ainsi que la géomorphologie du secteur des Subcarpatiques entre Motru et Gilort [Roşu, 1967]. Le chercheur *Iosif Ujvari* occupe une place particulière dans l'hydrologie roumaine, par ses travaux de référence à l'échelle de la Roumanie, englobant des informations aussi sur les rivières du bassin de la Jiu : "*L'hydrographie de la République Populaire de la Roumanie*" / "*Hidrografia RPR*" (1959) et "*Géographie des eaux de la Roumanie*" / "*Geografia Apelor României*" (1972).

Les travaux coordonnés par *Dumitru Lăzărescu* se sont orientés sur la méthodologie de prévision à court terme du débit des affluents de la rivière Jiu (1956), ainsi que sur les régimes hydrologiques. *Lăzărescu et Panait (1959)* ont été préoccupés par le développement de méthodes d'estimation des débits sur la base des relations régionales, entre l'altitude et les paramètres hydrologiques.

Une autre contribution importante à la connaissance de la rivière Jiu et du régime hydrologique de ses principaux affluents a été amenée par *C. Mociorniță et collab. (1960)*, qui ont étudié la variabilité temporelle des débits des affluents de la rivière Jiu dans son bassin inférieur (près de la ville de Craiova).



C. Mociorniță (1962) a étudié de son côté le secteur supérieur du bassin (le sous-bassin de la Jiu de l'Est notamment).

Les premières études complexes portant sur les phénomènes extrêmes ont été focalisées sur le phénomène de sécheresse des rivières du bassin de la Motru, le principal affluent de la rivière Jiu [Nițulescu et Păduraru, 1961]. Quelques années plus tard, Mustață (1965) a travaillé sur les débits maximaux de différentes probabilités aux pour les stations hydrométriques existant à ce moment-là dans les bassins de la rivière Jiu et de la Jiu de l'Est. En 1966, Mustață, Alboiu et Miță ont réalisé la première monographie hydrologique du bassin de la rivière Jiu (1966). Bien qu'ils n'aient pas de séries de données étendue (à l'exception de la station hydrométrique de Podari, avec ses mesures systématiques depuis 1950), les travaux susmentionnés offrent d'informations précieuses sur le régime hydrologique général du bassin hydrographique Jiu, ainsi que sur les phénomènes hivernaux sur les rivières de ce bassin.

Quelques années plus tard (1972), Mociorniță et Birtu ont analysé les inondations catastrophiques du 30 juillet 1969, engendrées par les rivières Motru et Tismana. Mociorniță a également analyse le régime saisonnier et mensuel des débits par rapport à l'année moyenne, calculée sur la base des données hydrologiques disponibles pour une partie des stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu [Mociorniță, 1969].

En 1972, en raison de la magnitude et l'extension des inondations événements hydrologiques survenues sur l'ensemble de la Roumanie (au mois d'octobre), de nombreux hydrologues ont analysé cet événement hydrologique et l'ont considéré, à ce temps-là, la plus grande inondation de l'histoire des mesures hydrométriques de la rivière Jiu [Trușă et Vrabie, 1973]. Constantin Savin (1973) analyse les caractéristiques hydrologiques des crues de l'Olténie du mois d'octobre 1972, en détaillant sur quelques stations hydrométriques plus importantes sur la rivière Jiu et ses affluents. Une année plus tard, le même auteur étudie la relation entre l'amplitude de la variation du niveau d'eau et la recharge de la nappe phréatique, en exemplifiant avec la situation de la crue d'octobre 1972. Des analyses de l'hydrographe de crue (avec la séparation de l'écoulement de base et l'apport pendant la crue) sont menées aussi sur la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est par Leonard Mustață (1975), qui a apporté des considérations importantes relatives à l'inondation d'octobre 1972 sur les rivières du sud du pays, avec une référence particulière au bassin supérieur de la rivière Jiu.

Après la période des années 1980-1990, où le bassin de la rivière Jiu a été moins étudié du point de vue hydrologique, à partir de 1990, mais surtout après 2000, Constantin Savin s'est consacré à l'étude des ressources en eau du bassin de la rivière Jiu. Le patrimoine hydrologique qu'il a laissé sur le bassin de la rivière Jiu englobe plusieurs travaux très précieux, depuis son premier ouvrage "*Les ressources en eau dans la vallée du secteur inférieur de la rivière Jiu*" / "*Resursele de apă ale Luncii Jiului*" (1990a), et "*Les Rivières de l'Olténie - Phénomènes hydrologiques exceptionnels*" / "*Râurile din Oltenia. Fenomene hidrologice de risc exceptional*" [Savin, 2003]. Ce travail est peut-être parmi les rares qui dépassent l'approche monographique des aléas hydrologiques en analysant l'origine des phénomènes hydrologiques en corrélation avec les facteurs de contrôle avec les paramètres statistiques des crues. Une autre recherche complexe a été la relation entre la hauteur de la couche de neige et les ressources en eau dans l'espace hydrographique Jiu – Danube [Savin, 1993].



Préoccupé par la problématique des pertes d'eau et, partant du phénomène de l'assèchement des rivières du sud de l'Olténie, avec un impact particulier sur l'agriculture et l'économie en général, [Constantin Savin](#) essaie de répondre à une question rhétorique sur l'aridisation du climat et l'impact potentiel sur les ressources en eau du bassin de la rivière Jiu (1995) en décrivant de manière assez synthétique la sécheresse hydrologique des rivières dans le bassin de la Jiu. En 1996 il a publié un deuxième travail sur les débits minimaux durant la période de sécheresse 1992/ 1993 [[Savin, 1996](#)]. L'augmentation des aménagements hydrotechniques sur les rivières du bassin de la Jiu a fait aussi un sujet de travail pour Savin qui discute dans une allocution dédiée à la rencontre franco-roumaine sur la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des bassins versants les avantages et les inconvénients des travaux de dérivations affectant la rivière Jiu et ses affluents [[Savin, 1997](#)]. Plus tard, le même auteur s'occupe du bassin de la rivière Jiu, en analysant en détail les facteurs contrôlant l'écoulement, la variabilité des débits liquides, ainsi que les plus forts événements hydrologiques affectant les rivières du bassin de la Jiu [[Savin, 2003](#) ; [Savin 2004](#) ; [Savin 2008](#)].

Pendant ce temps, en 2002, une thèse de doctorat sur les caractéristiques du bassin de la rivière Jiu et la modélisation de l'écoulement par les techniques des réseaux neuronaux a été réalisée [[Barbaăată, 2002](#)] en complétant les monographies hydrologiques compréhensives réalisées par Constantin Savin. Depuis, le bassin de la rivière Jiu n'a plus été le sujet de gros travaux de recherche hydrologique, mais des études plus restreintes (hydrologiques, géomorphologiques ou environnementales) englobant des informations sur l'écoulement de la rivière Jiu et ses affluents. Nous rappelons dans ce contexte les contributions de [Dumitaşcu \(2010\)](#), [Minoniu \(2011\)](#), [Moroşanu \(2012\)](#), [Telteu et al. \(2014\)](#), [Ionuş et al. \(2015\)](#), qui ont réalisé des évaluations du potentiel aux crues du bassin de la rivière Jiu.

L'étude des débits solides a pu être réalisée après la mise en service des principales stations hydrométriques à mesures complètes (débits liquides et solides). [Constantin Diaconu](#) a été le premier hydrologue qui a centralisé dans des études à l'échelle nationale les résultats des mesures du débit solide et les a mis en relation avec les facteurs morphométriques, les débits liquides et les particularités géologiques. Il a une contribution très précieuse à la connaissance des transports en suspension sur les rivières en Roumanie [[Diaconu, 1964](#); [Diaconu, 1971](#)]. Le même auteur a également contribué au perfectionnement du système de mesure et de calcul des débits d'alluvions en suspension, en soulignant les implications hydrométriques de leur détermination indirecte (basée sur le débit liquide) [[Diaconu, 1967](#); [Diaconu, 1968](#); [Diaconu, 1969](#)]. Dans son article "*Résultats sur le transport des alluvions en suspension des rivières de la Roumanie*" (1969), [C. Diaconu](#) a calculé les valeurs moyennes du débit spécifique d'alluvions en suspension sur des tranches d'altitude et a établi des corrélations entre le flux liquide et celui solide. Des valeurs moyennes des taux d'érosion comme vecteurs clé de la production des alluvions ont été également calculées dans cet ouvrage. Les travaux de Diaconu englobent des informations importantes sur le transport sédimentaire dans le bassin de la rivière Jiu.

En ce qui concerne le problème d'origine des sédiments, de la variabilité du flux solide et des processus hydromorphologiques, le bassin de la rivière Jiu a attiré l'attention de plusieurs chercheurs. L'étude du régime des alluvions dans le bassin de la rivière Jiu a été lié aux problèmes des aménagements hydrotechniques et hydroélectriques. Dans le volume "*Etudes et recherche en hydrologie*" / "*Studii și cercetări în hidrologie*" [[INMH, 1976](#)], 10 stations hydrométriques ont été utilisées pour le traitement statistique des débits d'alluvions en suspension pour des périodes entre 3 et 10 ans.

Depuis 1990, des études consacrées uniquement aux alluvions en suspension transitant dans le bassin du Jiu sont apparues, la plupart d'entre elles étant menées par le chercheur *C. Savin*. Bien que moins nombreuses et plus détaillées par rapport aux études sur les flux liquides, celles-ci revêtent une importance particulière en raison de la nature des paramètres du flux sédimentaire et des variables morphométriques et hydrologiques et les écoulements solides [[Savin, 1990b](#)]. En 1994, une deuxième publication du même auteur, intitulé "*Valeurs extrêmes des alluvions en suspension dans les bassins de la rivière Jiu - Affluents du Danube*" / "*Valori exceptionale ale scurgerii solide de aluviuni în suspensie în bazinele hidrografice Jiu – Afluenții Dunării*", est apparue, dans laquelle les débits solides maximaux étaient liés aux événements hydrologiques extrêmes [[Savin, 1994](#)]. En 2000, Savin a analysé les débits des alluvions en suspension de l'espace entier situé entre le Danube (à l'ouest), et la rivière Olt (à l'est), la rivière Jiu et ses affluents occupant une place privilégiée. Un an plus tard, l'auteur publie son ouvrage synthèse, "*L'hydrologie des rivières – théorique et appliquée*", dans lequel les débits d'alluvions en suspensions sont analysés à travers des exemples de nombre de stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu, mais pas seulement [[Savin, 2001](#)]. Un court travail sur la variation des flux solides sur les rivières de l'Olténie durant une période de 50 ans a été publié en 2005, synthétisant un grand nombre de données hydrologiques [[Savin, 2005](#)]. Ce travail a été inclus dans un dernier volume intitulé "*Phénomènes de risque exceptionnel sur les rivières de l'Olténie*" / "*Fenomene de risc exceptional pe râurile din Oltenia*" [[Savin, 2006](#)]. Les plus importants épisodes de crue (des années 1972, 1991, 2005) y sont analysés à la fois du point de vue des volumes d'eau et des quantités des alluvions en suspensions transitées par ces volumes.

Les recherches portant sur la dynamique hydro-morphologique dans le bassin de la rivière Jiu ont été moins développées et beaucoup plus dispersées, laissant ainsi la place à des approches actuelles et futures sur la phénoménologie de la dynamique hydro-sédimentaire à l'interface versant - le lit fluvial. Depuis les années 1990, Rădoane et ses collaborateurs s'intéressent à l'augmentation des risques géomorphologiques sous l'influence des activités humaines, ce qui a des conséquences négatives sur la dynamique hydro-sédimentaire. Pour le bassin de la rivière Jiu, ils ont conclu que les alluvions transportées par Jiu pourraient diminuer de 80% du total des suspensions transportées, ce qui est un effet des lavages hydrauliques dans les stations de préparation et de tri du charbon [[Rădoane, 2004](#)]. Dans la même année, un budget alluvial a été calculé pour l'entrée et la sortie de la rivière Jiu dans le secteur des gorges [[Rădoane et Rădoane, 2004](#)]. Les deux auteurs ont également approfondi dans les années suivantes le problème de la sédimentation des réservoirs et ont développé des relations de synthèse entre la superficie des bassins de drainage et le volume de sédiments fins lié au substrat géologique dominant et de la présence des activités d'exploitation du charbon dans le bassin supérieur de la rivière Jiu [[Rădoane et Rădoane, 2005](#)]. De plus, dans le régime des débits solides, en analysant les valeurs d'une année caractérisée par un débit liquide de 6 à 7 fois plus élevée que celui d'une année moyenne (le cas de 1991), deux relations entre le flux spécifique liquide et solide, en fonction de l'activité saisonnière des mines de charbon ont été obtenues [[Rădoane et Rădoane, 2006a](#)]. L'analyse en laboratoire des échantillons de sédiments fins s'ajoutant à ceux destinés aux mesures opérationnelles du réseau hydrométrique de l'Administration Nationale des Eaux Roumaines ont été réalisés par la même équipe de chercheurs afin de mettre en évidence la nature minéralogique des alluvions en suspension transportées le long de la rivière Jiu [[Rădoane et Rădoane, 2006b](#)]. L'influence de l'exploitation minière sur le transport alluvial dans le bassin du haut Jiu a été analysée du point de vue du

budget alluvial et des effets possibles de l'eau chargé du charbon sur certaines structures hydrotechniques [Rădoane *et al.* 1995; Rădoane et Rădoane, 2006a ; Rădoane et Rădoane, 2006b].

La dynamique latérale du lit de la rivière Jiu a reçu moins d'attention, malgré la complexité des facteurs de causalité, confirmée par plusieurs auteurs [Savin, 2005; Ionuș, 2014 ; Moroșanu, 2014]. Cependant, les dernières années, des chercheurs se sont penchés sur les risques géomorphologiques susceptibles d'affecter indirectement la dynamique du lit de la rivière Jiu et d'augmenter le débit solide [Boengiu *et al.*, 2005; Săndulache et Săndulache, 2014].

La qualité des eaux de surface du bassin de la rivière Jiu a aussi constitué un sujet de recherche rigoureusement exploré, étant données les activités anthropiques (surtout les industries minière et énergétique) caractéristiques de la région. L'analyse de la qualité de l'eau a été faite pour atteindre plusieurs objectifs, la plupart correspondant à la législation interne dans le domaine de l'eau en Roumanie [La loi de l'Eau, 1996] et à la Directive Cadre Européenne de l'Eau [CE/60/2006]. Les études des géographes se sont focalisées notamment sur la classification de la qualité des rivières en fonction de différentes catégories d'indicateurs de qualité de l'eau [Șerban et Mititelu – Ionuș, 2011]. On en ajoute deux autres travaux portant sur l'évaluation de la qualité des eaux de surface dans le bassin inférieur de la rivière Jiu [Șerban, 2011], sur l'état écologique des masses d'eau du sous-bassin hydrographique de la rivière Motru [Ionuș, 2011], ou l'évaluation du potentiel à l'humidité de la végétation et le sol par les indices satellitaires [Moroșanu, 2017].

Les travaux menés par les ingénieurs des structures universitaires du bassin de la rivière Jiu (Faculté des Mines de Petroșani, et l'Université "Constantin Brâncuși" de Târgu Jiu) spécialisées dans le domaine de l'exploitation des ressources minérales et l'impact sur l'environnement sont, par contre, plus orientés sur les mesures techniques de modernisation de l'activité industrielle en accord avec les normes d'environnement et valorisation des déchets industriels, d'où les plus marquants dans le relief sont les tas de stérile [Corici, 2004]. La proposition du prof. E. Traistă *et collab.* de valorisation économique des stocks sédimentaires accumulés dans les réservoirs sur la rivière Jiu (le sable et l'argile dans le secteur de construction et charbon dans le secteur énergétique) est dans ce sens révélatrice pour illustrer l'influence des activités anthropiques sur la quantité de sédiments transitée dans le bassin de la rivière Jiu [Fodor *et al.*, 2006 ; Traistă *et al.*, 2007].

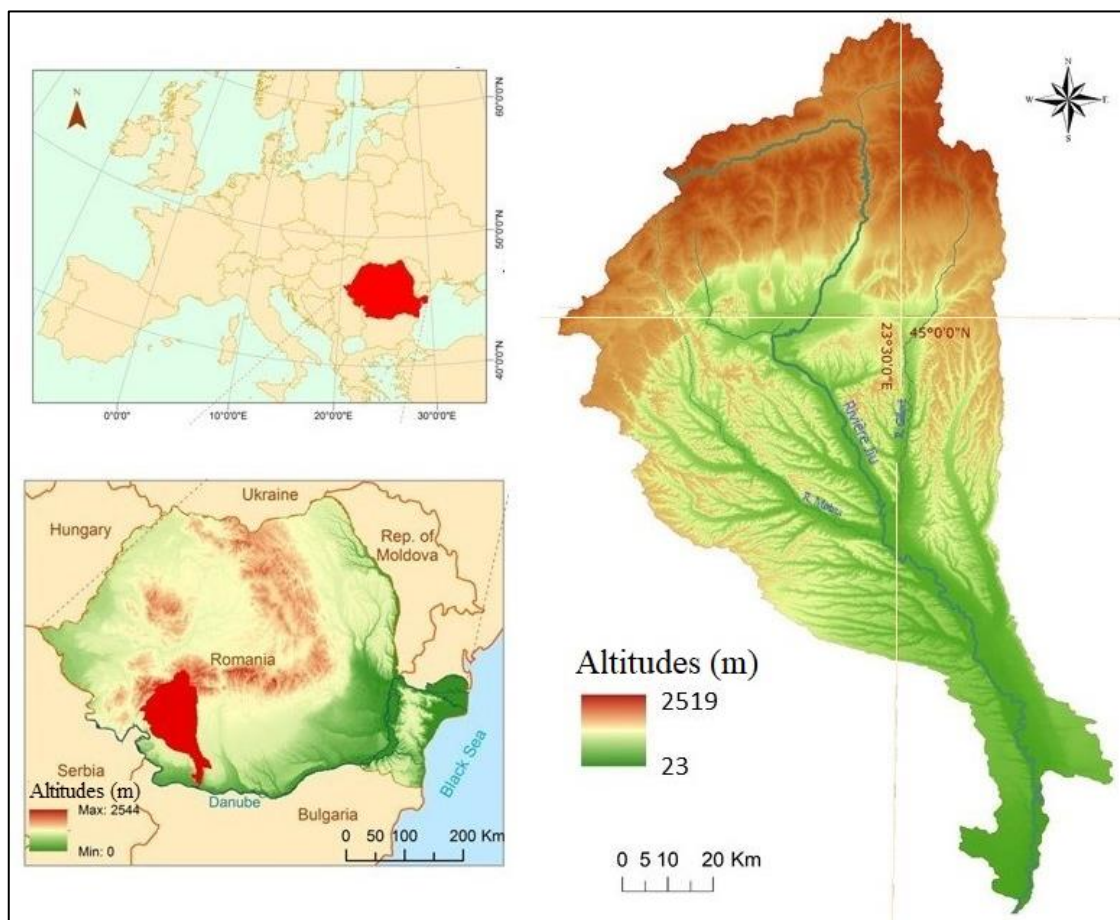
Les analyses en laboratoire des indicateurs chimiques et de la turbidité de la rivière Jiu dans son secteur correspondant au département Gorj ont montré le rôle dans l'altération du régime de qualité de l'eau joué par les bassins d'extraction du charbon, aussi dans la Dépression de Petroșani (la houille) que dans les bassins du piémont (Motru – Rovinari). Il a également été constaté que dans toutes les sections analysées, la teneur en matières en suspension suivie le même cycle du fonctionnement des unités d'extraction, lavage et production du charbon, de sorte que le volume des alluvions transitées entre le secteur supérieur et la ville de Târgu Jiu est plus grand dans les périodes d'activité industrielle intense [Cârțină, 2013]. Toutefois, la tendance dans la variabilité des matières en suspension se trouve actuellement sur la pente descendante, comme conséquence de la diminution générale de l'activité minière et de la clôture ou mise en conservation de plusieurs mines dans le secteur supérieur [Cârțină et Căpățină, 2007]. Il est généralement admis que la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines dans le bassin de la rivière Jiu, surtout dans la partie appartenant au département Gorj, est influencée par l'exploitation et le traitement des réserves naturelles (principalement charbon et en secondaire le pétrole et les granulats des lits des rivières), sans respecter les

restrictions écologiques [Cârțină et Căpățină, 2007] ; Ionică *et al.*, 2013]. La relation entre les déchets solides des usines de préparation du charbon et la qualité et quantité des sédiments fins a été analysée du point de vue de la granulométrie et du taux de matières en suspension d'origine anthropique, mais aussi dans la perspective de la valorisation des sédiments déposés dans la cuvette des réservoirs situés en aval de ces zones industrielles [Hânțanu et Părău, 2005 ; Călinoiu *et al.*, 2010]. Dans ces travaux, les sources de pollution des rivières ont été ainsi classifiées selon le secteur d'activité (extraction primaire du charbon ou différentes étapes dans sa préparation) et selon la grandeur de l'impact (quelle superficie de la zone affectée, sources ponctuelles ou longueur de contact entre la source de pollution et la rivière concernée).

Tenant compte de l'état d'avancement des travaux, encore à l'origine, en termes d'hydrologie (variabilité des flux liquides et solides), de l'impact des activités anthropiques sur la formation (ou la découverte) de nouvelles sources de sédiments et de la dimension systémique de la dynamique hydromorphologique, nos recherches envisagent à détailler davantage les aspects concernant le rôle des événements extrêmes dans le transfert des alluvions et la relation avec les activités industrielles à travers leur composition géochimique.

### 3.2. Repères de localisation

Le bassin hydrographique de la rivière Jiu, un des affluents carpatiques principaux du fleuve Danube, est situé dans la partie sud-ouest de la Roumanie, correspondant à la partie occidentale de la province historique de l'Olténie (*Figure III.1.*).



**Figure III.1.** Le bassin versant de la rivière Jiu et sa localisation

Ce territoire est traversé par le parallèle 45° lat. N et délimité par les méridiens de 22° 45' de long. E et 24° long E, respectivement par les parallèles de 43°45' - 45°30' lat. N.



Dans ces limites, le bassin de la rivière Jiu occupe une superficie de 10.070 km<sup>2</sup>, représentant près de 4,23% du territoire roumain et environ 1,26% du bassin du Danube. Le bassin a une forme allongée sur la direction générale nord – sud (avec une longueur d'environ 200 km), avec des largeurs qui varient de 95 km dans le secteur supérieur à moins de 10 km vers l'embouchure. Parmi ses affluents les plus importants sont la Motru (affluent de droite de la rivière Jiu) et Gilort (affluent gauche), deux rivières provenant du secteur karstique des Carpates du Sud et imposant une dynamique différente des flux liquides et solides [Savin, 2003 et 2008].

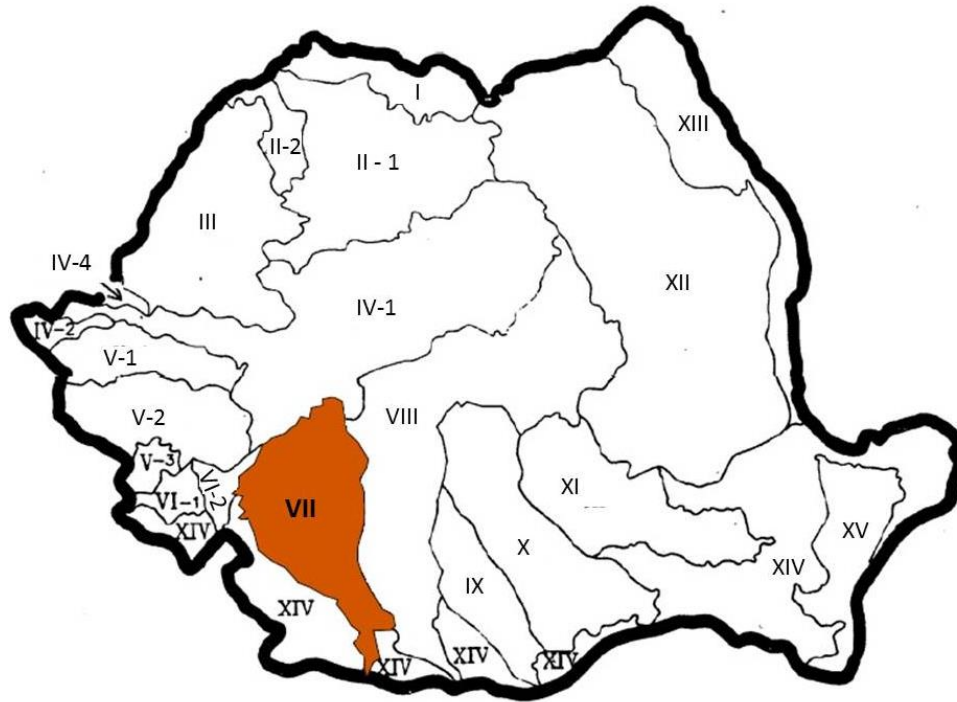
Les limites sont décrites par la ligne de partage des eaux. En nord-est, du sommet de Petru (2130 m) vers le sud au long de la crête de Parâng, la ligne de partage des eaux traverse des sommets de plus de 1700 m et se dirigent tout droit vers le sud, jusqu'à la limite entre les Carpates et les Subcarpates. Après la traversée de la division occidentale des Subcarpates Gétiques, celle-ci longe le Piémont Gétique sur 72 km, séparant les Collines d'Amaradia du bassin de la rivière Olteț, l'affluent de la rivière Olt. La limite du bassin, traverse les Collines de Teslui vers le sud-est, sur une distance d'environ 40 km, pour ensuite entrer dans la Plaine Roumaine, qui entoure le bassin aux extrémités sud-est, sud et sud-ouest. Dans la partie inférieure de la rivière, au sud du village de Zăval, la limite croise le point de confluence entre la Jiu et le Danube, où on atteint des altitudes de moins de 50 m. Sur le côté droit du bassin, la limite s'éloigne légèrement de la plaine romaine pour remonter dans le Piémont Getic, dont les subdivisions vont dans l'ordre suivant (sur une direction générale SE – NV) : le Piémont de Bălăcița (sur une distance de plus de 90 km), les Collines de Coșuștea (dont la frontière occidentale chevauche presque entièrement le bassin de la rivière Jiu) et le Plateau de Mehedinți. A partir du nord-ouest de la localité de Nadanova, la limite rentre dans les Montagnes Carpates, entourant le massif Domogled - Sommet de Stan. Les altitudes remontent de 1465 m entre le massif du Domogled et le Massif de Cerna à 2456,9 maximum (le sommet de Custurii dans le Massif Retezat). Plus loin, la limite du bassin va lentement vers le nord-est à travers les montagnes de Tulisa et le Plateau Dacique, pour enfin rejoindre le sommet de Pătru.

Il en découle que le bassin de la rivière Jiu s'étale sur plusieurs unités de relief, qui descendent en altitude du nord au sud de 2519 m à 27 m : au nord, la chaîne méridionale des Carpates et les collines des Sous-Carpates Gétiques, ensuite le Piémont Gétique (Plateforme de Strehaia et le Piémont de Bălăcița) dans la partie centrale et la Plaine Roumaine, prolongée avec la plaine alluviale du Danube au sud. Le secteur montagneux occupe environ 23%, la partie collinaire et de plateau (69%) et le secteur de plaine (8%), avec toutes ses particularités hydrologiques spécifiques pour les trois secteurs [Badea *et al.*, 2001; Savin, 2003].

La rivière Jiu est le principal affluent du Danube dans la partie sud-ouest de la Roumanie. Il prend ses sources dans les Carpates, dans les monts de Godeanu et Parâng à une altitude entre 1500 et 2000 m. Son origine est considérée à la confluence de ses deux bras, la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est, près de la ville de Petroșani. La Jiu s'écoule ensuite vers le sud, en traversant plusieurs unités morphologiques jusqu'à l'embouchure avec le fleuve Danube [Badea *et al.*, 2001; Savin, 2003]. Au nord, le bassin de la rivière Jiu (code cadastral VII) est délimité par le bassin de la rivière Mureș (IV-1), à l'est par les bassins Olt (VIII) et Jieț (XIV<sup>2</sup>), et à l'ouest par les bassins hydrographiques de Desnățui (XIV) et Cerna (VI-2). La carte dans la **Figure III.2** montre l'encadrement du point de vue hydrologique du bassin de la rivière Jiu.

---

<sup>2</sup> XIV est le symbole pour les petits bassins affluents se situant principalement dans la plaine alluviale du Danube



**Figure III.2.** Repérage hydrologique du bassin de la rivière Jiu (selon le Cadastre des Eaux Roumaines). Les symboles correspondent à l'ordre des affluents directs (caractères romanes) du Danube et de second ordre (caractères arabes), en commençant avec le nord-ouest de la Roumanie, en direction antihoraire. Au bassin de la Jiu lui correspond ainsi la VIIIème position entre les affluents directs en Roumanie

Du point de vue administratif (**Figure III.3**), le bassin de la rivière Jiu s'étale sur le territoire de 4 départements, dont trois appartiennent entièrement à la région d'Olténie (Dolj - 36,9%, Gorj - 30,8% et Mehedinți - 26%) et l'autre (Hunedoara - 6,3%) correspond à la région de Transylvanie (à l'extrémité nord du bassin supérieur de la Jiu).

La population du bassin de la Jiu compte d'environ 1,5 million habitants. Le bassin englobe plusieurs villes dont les plus importantes sont Craiova (312.065 hab.), Târgu Jiu (82.504 hab.), Petroșani (37.160 hab.), Motru (19.079 hab.), Filiași (18.848 hab.), Târgu Cărbunești (7.897 hab.) et Baia de Aramă (5.349 hab.). Dans le secteur supérieur et moyen, les petites villes et communes ont prospéré pendant la période communiste autour de l'industrie extractive et des activités économiques connexes. Les plus connues localités où se trouvent différents centres de traitement du charbon primaire, de centrales thermoélectriques et d'usines chimiques fonctionnant à base de charbon comme matière première sont :

**a.** Le Bassin de lignite de Motru – Rovinari (secteur moyen) : Motru, Mătăsari, Rovinari, Turceni, Ișalnița ;

**b.** Le Bassin de Houille de Petroșani (secteur supérieur) : Petroșani, Lonea, Petrila, Vulcan, Uricani, Câmpu lui Neag.

Bien que l'intensité de l'extraction du charbon et des processus industriels connexes ait diminué après 1990, ces localités restent assez importantes au niveau régional, hébergent également d'importants complexes énergétiques à base de la préparation du charbon autochtone et des activités connexes (e.g. le transport ferroviaire, routier lié aux marchandises d'origine industrielle) le long de la rivière Jiu notamment.

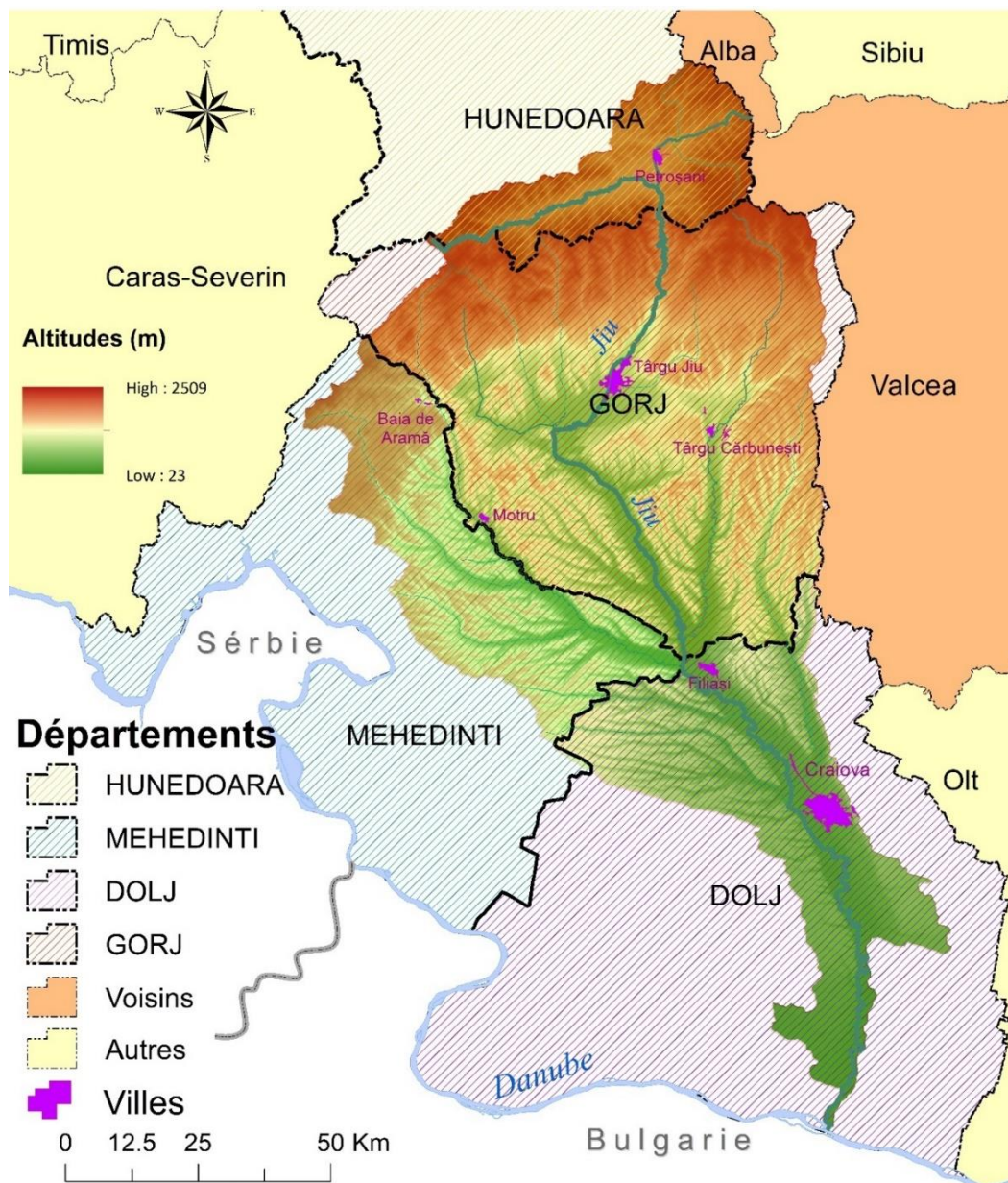


Figure III.3. Caractéristiques principales administratif-territoriales

### 3.3. Le substrat géologique

Les formations lithologiques dans le bassin hydrographique sont un facteur de contrôle majeur pour la dynamique hydro-sédimentaire. Par leurs caractéristiques (dureté, friabilité), les roches influencent la formation et la variabilité spatiale des flux liquides et solides, ainsi que les processus de dynamique fluviale. La présence des roches charbonneuses, dont les particules sont très souvent présentes dans les alluvions de la rivière Jiu et de ses affluents, revêt une importance particulière dans notre étude.

La caractérisation de la géologie du bassin de la rivière Jiu a été effectuée à des informations tirées des documents bibliographiques et d'une série de supports cartographiques :

- La carte géologique de la Roumanie 1: 200.000 (feuilles de Craiova, Turnu Severin, Calafat – Bechet, Orăștie, Târgu Jiu, Baia de Aramă) éditées par le Comité d'État de Géologie, l'Institut Géologique, y compris les textes explicatifs associés;
- L'échelle géochronologique au niveau de la Roumanie (Posea, Popescu, Ielenicz, 1974).

Les cartes à l'échelle 1:200.000 ont été téléchargées individuellement au format GeoTiff en version géoréférencée, du portail [geo-spatial.org](http://geo-spatial.org). D'autres deux cartes se trouvant sous format non référencé ont



été pour une partie téléchargée au format JPEG et visualisées en ligne, ou scannée en version papier des archives de la Bibliothèque de Géographie de l'Université de Bucarest et de l'Institut de Géographie de l'Académie Roumaine. Toutes les cartes ont été géoréférencées dans le système de projection cartographique national Stereo 70 pour pouvoir les superposer et ensuite extraire les catégories d'informations utilisées pour la réalisation des cartes illustrant dans une manière synthétique les particularités géologiques du b.v. de la rivière Jiu: les formations géologiques groupées selon leurs âges (du précambrien jusqu'au quaternaire) et les principaux types de roches couvrant le bassin.

\*\*\*

Le bassin de la rivière Jiu correspond géologiquement à deux unités géostratigraphiques : l'unité de l'orogène carpatique (au nord) et l'unité vorland, représentée par la plate-forme valaque au sud [Mutihac *et al.*, 2004; Frunzescu et Brănoiu, 2004]. L'unité de l'orogène du bassin de la rivière Jiu est le résultat de l'évolution d'une zone labile du type rift en Mésozoïque (faille centrale des Carpates) qui a entraîné la séparation de deux unités : la dépression gétique (Carpatique) et la limite est-continentale (qui deviendra l'autochtone danubien). De l'expansion de la dépression gétique a résulté la Fosse de Severin [Munteanu – Murgoci, 1912]. Au cours des mouvements tectoniques mésozoïques, les roches cristallines constituant les noyaux actuels des Carpates ont subi des fractures et des processus d'élévation. Vers la fin du Crétacé, l'avancement du bloc Transylvain (ancien correspondant de la microplaque Pannonienne - Transylvanienne) du nord vers le sud sur le bloc Gétique, a mené à la fermeture du rift qui les séparait.

La dépression gétique (partie de la chaîne des Carpates) entre en contact vers le sud avec la plate-forme Valache, qui est séparée par la Faille Péricarpatique [Barbălată, 2002]. Elle s'est formée pendant les mouvements laramiens, en raison de l'immersion et la subduction du côté nord de la plateforme valache sous l'autochtone danubien. La dépression repose de manière asymétrique sur les bords des deux unités; ses fondements sont mixtes: au nord, et en grande partie, elle est d'origine carpatique et au sud de type plate-forme [Mutihac *et al.*, 2004].

Les nouveaux mouvements tectoniques en Néozoïque ont contribué à la finalisation des dépressions intramontagneuses [Savin, 2008]. Les dépôts accumulés par la suite (d'âge Sarmate-Pliocène) ont une inclinaison du nord au sud, avec des discontinuités. En Pliocène, le lac péricarpatique se rétrécit et les mouvements néotectoniques Quaternaires ont mis en place la base morphostructurale [Popescu, 1955]. Les mouvements de subsidence ont favorisé l'individualisation de la dépression gétique comme une zone de convergence hydrographique. Ces mouvements sont aussi considérés à l'origine des dépôts fluviatiles quaternaires [Badea, 1967].

De manière générale, le territoire du bassin de la rivière Jiu s'étale sur plusieurs domaines géologiques, qui suivent également du sud au nord la mise en scène morphologique et d'altitude [Badea, 1967 ; Barbălată, 2002 ; Mutihac *et al.*, 2004]:

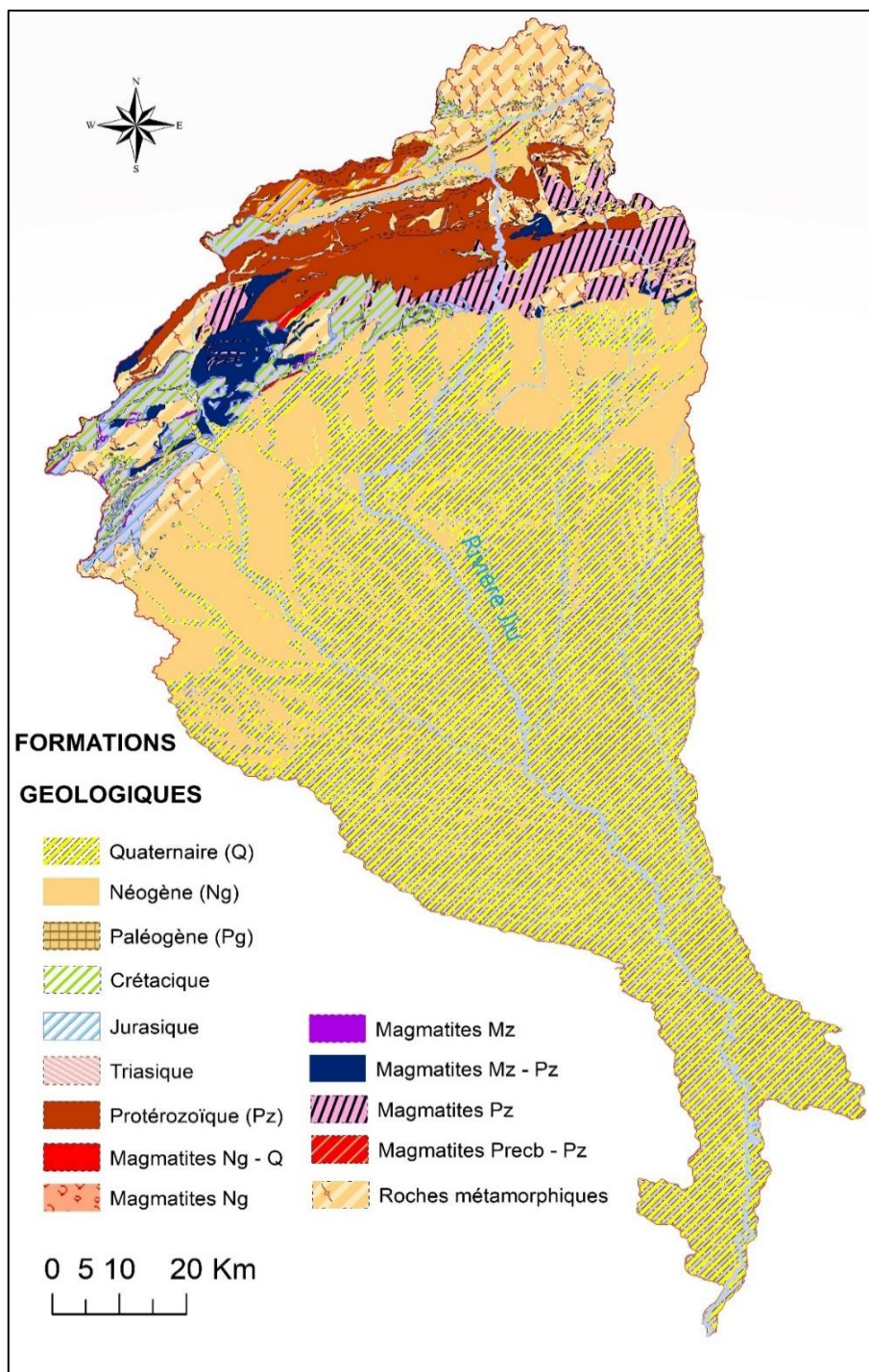
- (i) **La plateforme moessieque**, constituée par une couverture sédimentaire reposant quaternaire sur des formations appartenant au Paléozoïque, Mésozoïque, Paléogène et au Néogène. ;
- (ii) **La zone d'avant-fosse des Carpates Méridionales** avec de dépôts de graviers et cailloutis à matrice de sable grossier, le plus anciennes étant attribués au Villafranchien du Pléistocène inférieur ;
- (iii) **La dépression gétique** englobe des formations tertiaires ;
- (iv) **L'autochtone danubien**, avec une couverture sédimentaire paléozoïque et mésozoïque ;

(v) Le flanc sud des Carpates Méridionales, prédominé par des formations cristallophylliennes et une structure géologique compliquée ; pour la plupart, cette zone est continuée par des formations du cristallin danubien (série de Lainici – Păiuș), percées par des massives de granites et granitoïdes ;

(vi) Le parautochtone de Severin, sous forme de lentilles à l'intérieur de l'autochtone danubien ;

(vii) Les dépressions post-tectoniques, généralement recouvertes de sédiments néogènes.

Dans la **Figure III.4** les formations géologiques couvrant le territoire du bassin de la rivière Jiu sont groupées selon leur âge. Pour des raisons d'économie d'espace, plus de détails sur les types de roches de chaque catégorie sont montrés dans la carte de **l'Annexe I**. Dans ce qui suit, nous présenteront brièvement les principaux types de roches correspondantes aux âges/ périodes majeures de leur formation.



**Figure III.4.** La carte géologique du bassin de la rivière Jiu : les âges majeurs des formations lithologiques (*source : Carte géologique de la Roumanie 1 :200.000*)

Les plus anciennes formations lithologiques du bassin de la rivière Jiu sont représentées par les lamprophyres précambrienne-protérozoïques, isolés à l'extrémité occidentale du Massif Vâlcan. Les roches appartenant à la période suivante, le *Protérozoïque*, englobent plusieurs types : schistes argileux, migmatite, périclase, schistes épimétamorphiques, quartzite, ainsi que toute une série de magmatites dans le nord-ouest du bassin. Au *Protérozoïque* et *Mésozoïque* appartiennent presque la totalité des magmatites existant dans le bassin de la rivière Jiu.

Le *Jurassique* est représenté par des calcaires, marno-calcaires, grès et conglomérats, répartis sur des aires réduites au nord-ouest du bassin versant, orientées de NE vers SO. Le complexe jurassique est constitué par des calcaires stratifiés, dont une partie d'origine récifale, ainsi que des calcaires rouges et violacés [Mutihac *et al.*, 2004].

Au *Crétacé* appartiennent les calcaires, conglomérats, marno-calcaires, argiles rouges et Wild flysch présentes au sud les Carpates, occupant des surfaces importantes dans les Massifs de Cerna et Mehedinți. Dans le massif de Cerna et le bassin supérieur de la rivière Coșuștea, les calcaires sont surmontés en concordance par un complexe lithologique connu sous le nom de « Strates de Nadanova ».

Le *Paléogène* est particulièrement présent dans la zone de contact entre les Carpates et les Subcarpates Gétiques, les plus représentatifs étant les conglomérats, les grès et les argiles marneuses. Il existe localement des grès siliciques, des marnes bitumineuses et des schistes disodiques [Savin, 2008].

Les formations du *Néogènes* sont dominées par la présence d'assemblages de grès et de marnes qui occupent les collines subcarpatiques et la zone de contact entre le Piémont Gétique et le Piémont de Mehedinți. Des roches d'âge néogène se trouvent également dans les dépressions intra carpatiques, représentées par des : grès, sables grossiers, marnes, conglomérats.

Les formations du *Quaternaire* couvrent la plus grande surface du bassin (**Figure III.4**). Elles sont généralement représentées par des sables, graviers, argiles et marnes, occupant la région de plaine et les dépressions du piémont et des Subcarpates. Par endroit, dans la région de plaine, il y a des dépôts épais loessoides de 3 à 15 m. Au Quaternaire appartiennent également les dépôts alluviaux et ceux des terrasses basses du Danube, de la rivière Jiu et de ses affluents.

Les caractéristiques géologiques (pétrographiques, structurelles, tectoniques et sismiques) sont déterminantes pour les particularités morphologiques qui, à leur tour, influencent l'écoulement superficiel et souterrain. La connaissance des conditions géologiques est essentielle dans les études hydrologiques en raison de leur influence directe ou indirecte, sur les caractéristiques qualitatives et quantitatives des ressources en eau, ainsi que sur les processus hydro-géomorphologiques (érosion, transport, accumulation).

\*\*\*

Liés à la lithologie du bassin versant de la rivière Jiu sont les gisements de charbon. Le charbon se trouve dans des couches horizontales, qui alternent avec des formations géologiques daciennes, romaniennes et quaternaires, constituées par des marnes, argiles et sables. Ces formations peuvent être regroupés en deux zones [Năstăseanu, 1984]: (i) la zone située dans les Carpates, avec du charbon de qualité supérieure (anthracite, houilles et lignite supérieur) dans la Dépression de Petroșani et dans le gisement de Schela ses Subcarpates Gétiques; (ii) La zone située dans les Subcarpates et le Piémont Gétique, avec des gisements de lignite exploités dans le bassin de Rovinari, Motru, Jilț et Mehedinți (Hușnicioara).

La première zone, correspondant à la Dépression de Petroșani, drainée par la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est, à la haute vallée de la Jiu, ou au bassin Petroșani, repose sur un socle cristallin rempli de dépôts sédimentaires de molasse [Belkin *et al.*, 2010]. Ce sont des charbons tertiaires enfouis dans une structure synclinale asymétrique formée lors de l'orogénèse alpine et croisée par des failles transversales. Le charbon qui peut être exploité dans ce bassin montagneux est le charbon bitumineux d'Oligocène (Chattian). Il y a une vingtaine de gisements de charbon dans la haute vallée de la Jiu [Petrescu *et al.*, 1973]. Une particularité de ce bassin houiller est donnée par le fait que, bien que le rang des charbons de la plupart des gisements oligocènes de Roumanie et d'autres pays européens correspond au lignite, les charbons bitumineux de la vallée de la Jiu ont été affectés par le métamorphisme régional et par les fluides hydrothermaux liés à l'événement orogénique alpin, ce qui les a aidés à évoluer plus vite [Belkin *et al.*, 2010]. Dans la deuxième zone, plus connue sous le nom de "bassin Motru - Rovinari", les lentilles de lignite sont intercalées avec des marnes et des argiles marneuses et ont un âge similaire avec le charbon de la zone de montagne. Cependant, étant une zone d'accumulation, moins affectée par l'activité tectonique, le charbon n'a pas connu la même métamorphose comme celui de la zone carpatique et il est resté au rang inférieur de lignite.

La deuxième zone correspond au bassin de lignite de l'Olténie, mieux connu sur le territoire du bassin de la rivière Jiu comme « Le bassin de Motru – Rovinari ». La lithologie des carrières est représentée par une alternance d'argiles, sables et charbon, avec des épaisseurs de plusieurs mètres [Nistor, 2002].

Le charbon se trouve dans des couches horizontales, qui alternent avec des formations géologiques daciennes, romaniennes et quaternaires, constituées par des marnes, argiles et sables [Nistor, 2002]. Les horizons aquifères présentent un développement variable, tant en ce qui concerne leur nombre qu'en ce qui concerne leur extension, en fonction de la présence des sables [Preda *et al.*, 1994].

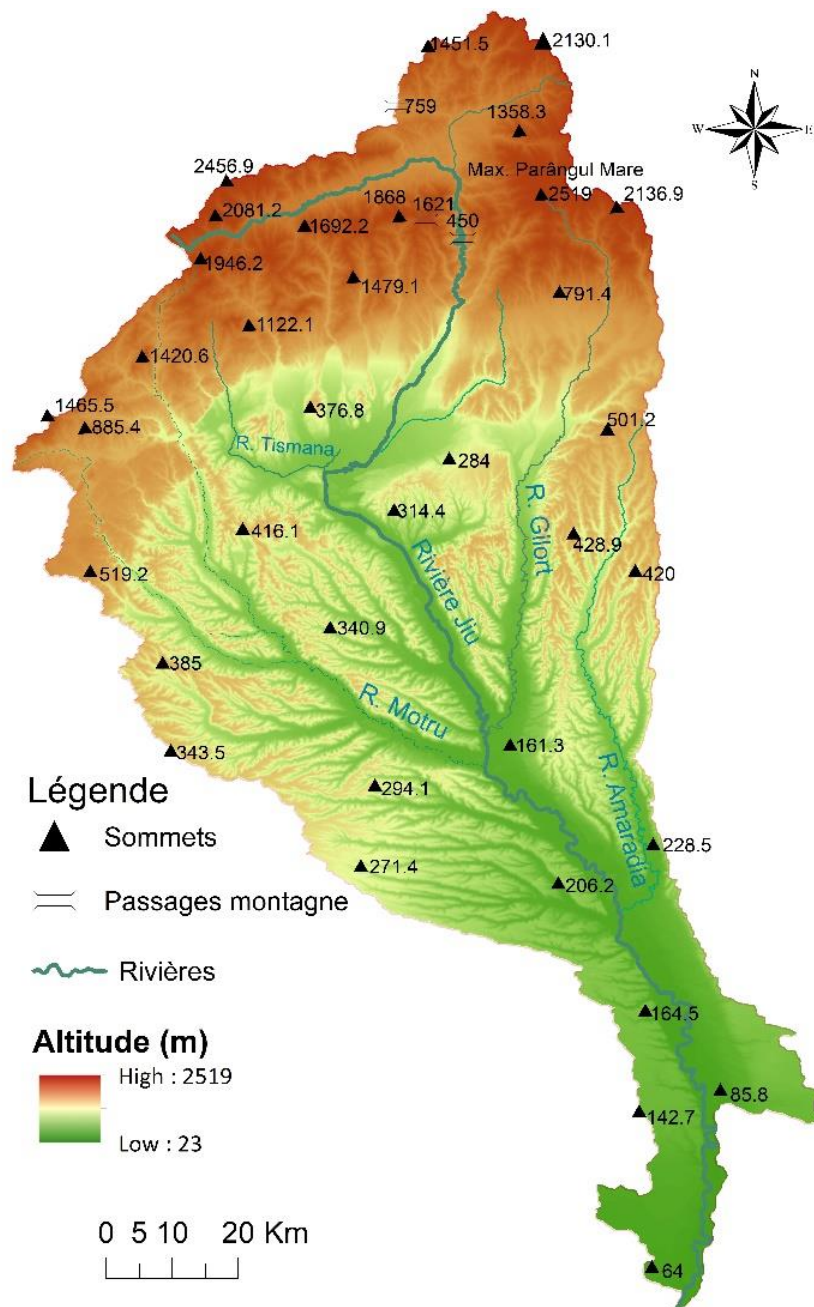
### **3.4. Les unités morphologiques**

Le relief représente le cadre sur lequel les vallées des rivières ont été sculptées, il est partie composante des bassins versants et il héberge les flux de matières et les processus affectant la dynamique hydro-sédimentaire et le profil en long et en travers des cours d'eau. La morphologie des différents secteurs des bassins versants est toujours en dépendance avec les particularités du relief (forme des versants, processus géomorphologiques installés, pente et altitude).

#### **3.4.1. Les unités morphologiques. Caractéristiques générales**

La géologie complexe est reflétée par une grande diversité de formes de relief : montagnes, dépressions, vallées, collines, plateaux et plaines. Les altitudes baissent progressivement du nord au sud (**Figure III.6**), de 2519 m (dans le Massif de Parâng, le Sommet Parângul Mare) à 27 m (à la confluence de la rivière Jiu avec le Danube). Environ 23% de la superficie totale du bassin de la rivière Jiu, à savoir la partie nord, correspondant à la région montagneuse (carpatique), les collines appartenant aux Subcarpathes et Piémont Gétique et au Plateau de Mehedinți détiennent environ 69%, tandis que la plaine occupe peu près de 8%.



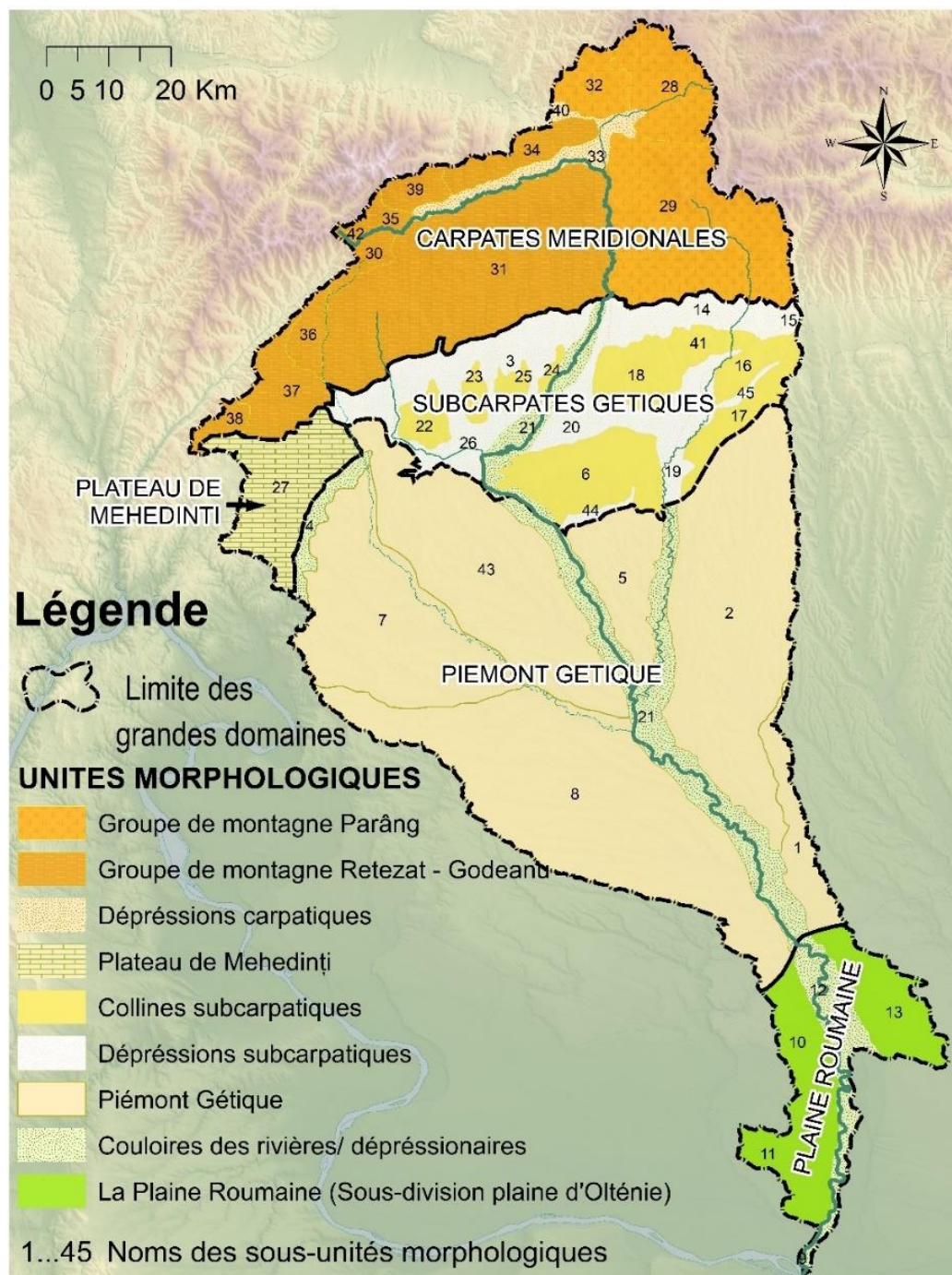


**Figure III.5.** La carte hypsométrique du bassin de la rivière Jiu

Le relief englobe quatre unités morphologiques majeures principaux domaines (montagnes, collines subcarpatiques, collines de piémont et plaine), disposées sous la forme d'un amphithéâtre étalé du nord au sud. Chacune des quatre unités est individualisée par genèse, morpho-structure, morphologie, morpho-dynamique et présente des caractéristiques géographiques, reflétées par les particularités hydrologiques de la rivière Jiu et de ses affluents.

Les quatre zones morphologiques correspondent aux quatre unités morphostructurales [Badea *et al.*, 2001]: **i)** l'unité cristalline-mésozoïque des Carpates, développés sur la nappe gétique (schistes cristallins percées par endroits de granites et de calcaire); **ii)** l'unité néogène des collines et des dépressions subcarpatiques, constituées de dépôts sédimentaires d'origine carpatique pliés et parallèles au bord de la montagne; **iii)** l'unité monoclinique du Piémont Gétique formée de dépôts sédimentaires quaternaires d'âge quaternaire; **iv)** l'unité de plateforme, ainsi que de loess, avec une fondation cristalline profonde, couverte de dépôts quaternaires de différentes épaisseurs de sables et de gravier quaternaire, ainsi que de loess.

Dans la *Figure III.7* et le *Tableau III.1*, les principales unités et sous-unités géomorphologiques du bassin de la rivière Jiu sont présentées.



**Figure III.6.** Les unités morphologiques du bassin de la rivière Jiu en conformité avec la Carte des Unités de Relief de la Roumanie [Posea et Badea, 1984]

**Tableau III.1.** Les unités et sous-unités de relief du bassin de la rivière Jiu

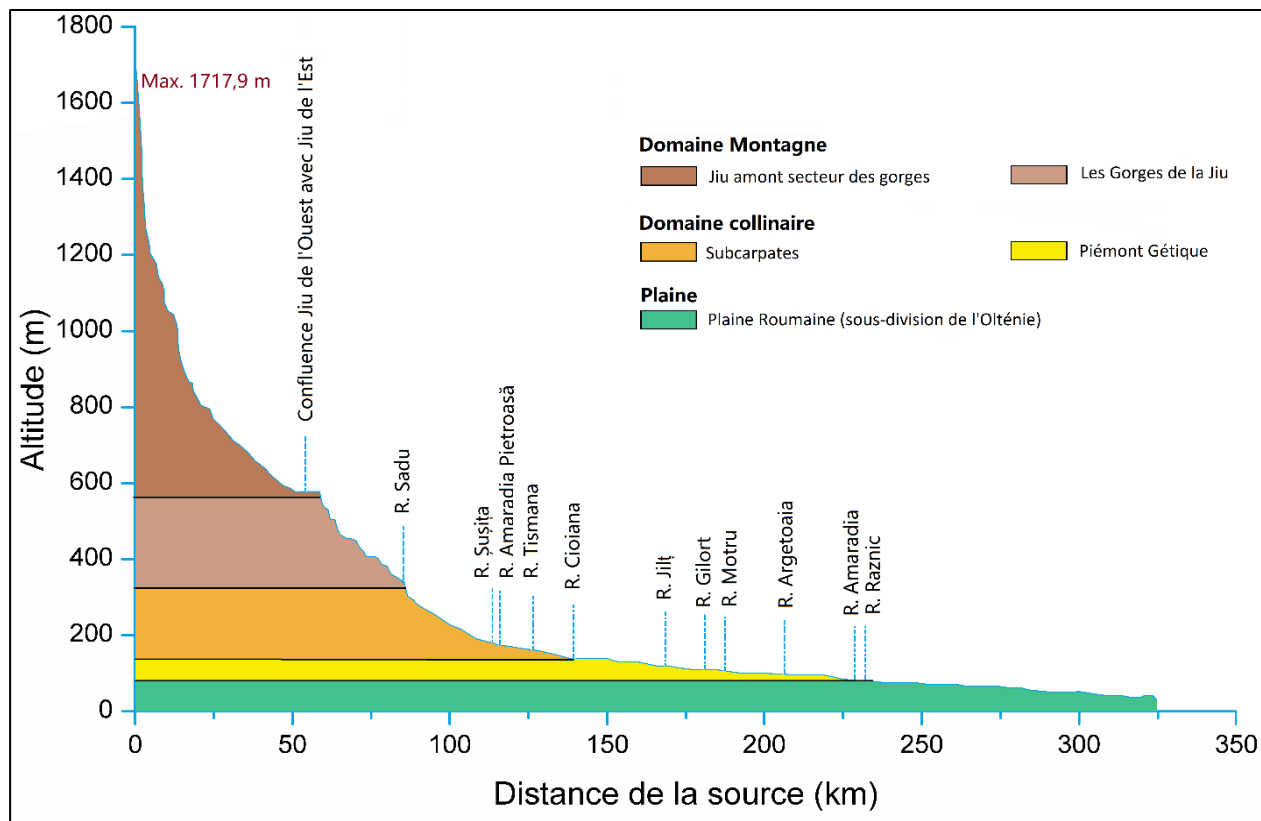
No	Nom de la sous-unité	Altitude max (m)
<b>GRUPE de MONTAGNES PARÂNG</b>		
28	Le Sommet de Pătru	2130 (Vf. Iui Petru)
29	Le Massif de Parîng	2519 (Vf. Parângul Mare/ Mândra)
32	Le Plateau de Dacique	1517
<b>GRUPE de MONTAGNE RETEZAT - GODEANU</b>		
30	Le Massif d'Oslea	1946,2 (Oslea)
31	Le Sommet de Vâlcan	1868,2 (Vf. Straja)
34	Les Montagnes de Tulisa	1791,8 (Tulisa)
35	Le Massif de Piule	2081,2 (Piule)

36	La Montagne de Piatra Cloșanilor	1420,6 (Piatra Cloșani)
37	Le Sommet de Cerna	1179,2
38	Le Massif de Domogled	1465,5 (Vf. lui Stan)
39	Le Massif de Retezat	2509 (Vf. Peleaga)
42	Le Massif de Godeanu	2291 (Vf. Gugu)
<b>DÉPRESSIONS CARPATIQUES</b>		
33	La Depression Petroșani	809 (Barbonari)
40	La Depression Hațeg	841,9 (Vf. Dealului)
<b>PLATEAU DE MEHEDINȚI</b>		
27	Le Plateau de Mehedinți	885 (Vf. Paharnicului)
<b>SOUS-CARPATES GÉTIQUES</b>		
<i>Collines subcarpatiques</i>		
16	La Colline de Cîrligei	597,8
17	Les Collines de Sîrbești	614 (Becheni)
18	Les Collines de Copăcioasa	453 (Copăcioasa)
22	La Colline Sporești	347,1
23	La Colline Rașova	307,6
24	La Colline Târgului	349,7
25	La Colline Brădiceni	334
6	La Colline de Bran	333
41	Les Collines de Ciocadia	597,8 (Dl. Seciului)
<i>Dépressions subcarpatiques</i>		
3	La Dépression de Tismana	
14	La Depression Bumbesti – Novaci	487,4
15	La Depression Polovragi	591,1 (Plaiul Lung)
19	La Depression Cărbunești (Câmpu Mare)	267,6
20	La Depression Târgu Jiu (partie est)	290
26	La Depression Târgu Jiu (partie ouest)	292,8
44	La Depression Ciolana	
45	La Depression Prigoriei	
<b>PIÉMONT GÉTIQUE</b>		
1	Plateau du Teslui	298,8 (Golumbu)
2	Les Collines de l'Amaradia	551 (Ruget)
5	Les Collines de la Jiu (Gruiurile Jiului)	392 (Culmea Ruschiului)
7	Les Collines (Piémont) de la Coșuștea	409,2 (Buliga)
8	Le Piemont de Bălăcița	359,8 (Dl. Mare Brebenel)
43	Les Collines du Jilț	425 (Poienile)
<i>Couloirs des rivières/ dépressionnaires</i>		
4	Le Couloir Drobeta - Bala	388,4 (Culmea Comăneștilor)
21	Le Couloir de la Jiu	
<b>La Plaine Roumaine (sous-division de la plaine de l'Olténie)</b>		
9	La Plaine de Bistreț	28
10	Le Champ de Sălcuța	155,5
11	Le Champ de Nedeii	94
12	La Plaine de Jiu - Jieț	68,2
13	Le Champ de Leu - Rotunda	172

Le long de la rivière principale, les altitudes baissent rapidement dans les premiers 50 km, de plus de 1700 m (à l'origine de la Jiu de l'Ouest dans le massif de Godeanu) vers environ 600 m, dans la Dépression de Petroșani, où la rivière Jiu se forme après la confluence de la Jiu de l'Ouest avec la Jiu de



l'Est. Ensuite, la rivière Jiu traverse un secteur de gorges (de 33 km de longueur) à forte pente (environ 9 m/km) et débouche dans la Dépression subcarpatique de Târgu Jiu en aval de la confluence avec la petite rivière Sadu. En aval de ce secteur, la pente diminue beaucoup et les altitudes baissent lentement de moins de 400 m à environ 25 m à l'embouchure avec le fleuve Danube (*Figure III.8*).



**Figure III.7.** Le profil longitudinal de la rivière Jiu

Les caractéristiques morphologiques ont un rôle important pour la dynamique des flux hydro-sédimentaire. L'influence du domaine montagneux a plusieurs facettes :

- Par les sources existantes dans ce domaine sont à l'origine des principales rivières du bassin ;
- Les montagnes constituent une barrière orographique pour la circulation des masses d'air de l'ouest, du sud et du nord, influençant ainsi le régime des précipitations et indirectement celui des débits liquides et solides ;
- En raison du taux de boisement plus élevé et à la lithologie plus résistante à l'érosion, le domaine montagneux présente une plus grande stabilité des pentes et des sols et, par conséquent, les quantités de sédiments sont plus faibles.

Les hauts sommets des massifs de Parâng et Retezat – Godeanu ont été affectés par la glaciation quaternaire, ce qui a créé un relief glaciaire, plus développé sur les versants nord de ces massifs. Le mouvement des glaciers a creusé des vallées glaciaires avec des secteurs de gorges, d'une importance particulière pour la concentration de l'eau et l'orientation du réseau hydrographique. Les formes glaciaires les mieux développées sont celles des montagnes du Parâng, sous sa crête centrale, prenant leurs sources les rivières Jieț, Sadu, Gilort et Pârâul Galben. La groupe montagneuse occidentale dominée par les massifs Retezat - Godeanu, d'une grande massivité et énergie de relief, présentent sous le versant sud, le lieu d'origine de la rivière Jiu et d'autres affluents coté droite. Son versant oriental constitue l'un des pôles de précipitation du bassin [Savin, 2003].

La zone de collines et de piémont est la plus développée, englobant des formes de reliefs dont l'altitude est inférieure à 800 m. En période de sécheresse, l'aquifère des plaines inondables accompagnant les rivières principales assurent leur alimentation. Certaines rivières, traversant les couches épaisses de graviers perméables, peuvent être affectées par le phénomène d'assèchement. Par contre, à la zone de contact entre le Piémont Gétique et la plaine, il y a de nombreuses sources qui alimentent les rivières et mêmes les localités.

Dans le petit secteur de plaine, la rivière Jiu est dépourvue d'affluents permanents. Lorsque les périodes de sécheresse se prolongent, l'alimentation pluviale des rivières de cette région est insuffisante, car les précipitations annuelles sont inférieures d'environ 100 mm à l'évapotranspiration totale [Savin, 2008]. Dans tout ce secteur, jusqu'à l'embouchure avec le Danube, le débit de la rivière Jiu n'augmente pas beaucoup par rapport aux secteurs d'en amont et sa vallée s'accompagne d'une plaine inondable assez étendue, qui sert de zone tampon naturelle pour l'écrêtement des grandes crues.

Les caractéristiques physico-géographiques des principaux secteurs seront présentées ci-dessous.

### 3.4.2. Le secteur montagneux

Ce secteur englobe les groupes des monts Retezat-Godeanu et Parâng, ainsi que la dépression intra-montagneuse Petroșani. Dans ce secteur, la Jiu et ses affluents drainent le versant sud du Massif de Retezat, les versants nord et ouest des Monts de Vâlcan, le versant sud du Massif Șureanu, les versants nord et est du Massif Parâng, ainsi que toute la dépression de Petroșani. Les altitudes du secteur montagneux varient de 500 – 600 m dans les dépressions jusqu'à 2519 m dans le sommet Parângul Mare. Dans les massifs de Parâng et Vârful lui Pătru (à l'est), Retezat - Godeanu et Piule – Iorgovanu (à l'ouest) plusieurs crêtes dépassent les 2000 m d'altitude. Du point de vue hydrogéographique, ce secteur peut être divisé, à son tour, en quelques sous-secteurs, selon leurs traits géologiques et géomorphologiques.

Un premier sous-secteur correspond à l'espace situé entre la source de la Jiu d'Ouest et sa confluence avec la rivière Rostovanu et appartient aux montagnes de Retezat et Godeanu. Le relief est développé en calcaires, marno-calcaires et microconglomérats d'âge crétacé, ainsi qu'en granites et granitoïdes mésozoïques – paléozoïques. Cette lithologie donne une certaine massivité au relief, ainsi que sa résistance face à l'érosion. Le secteur karstique du haut bassin de la Jiu d'Ouest se trouve en connexion avec les calcaires des Monts Godeanu et Vâlcan. Il compte deux crêtes parallèles, orientées de l'ouest vers l'est entre lesquelles la Jiu d'Ouest crée sa vallée, suivant avec approximation l'axe d'un synclinal.

Les calcaires d'âge jurassien-crétacé de ce secteur ont des épaisseurs de plus de 1000 mètres et s'imposent dans le paysage par la verticalité des versants et la fragmentation élevée (e.g. les Gorges de Bușii et les Gorges du Scocului Mare etc) et vers sa limite supérieure, il est continué par le relief glaciaire des Montagnes Retezat et Godeanu [Badea *et al.*, 1984]. Les vallées, formées au long des synclinaux, sont formées dans les grès et les argiles marneuses d'âge néogène. Le trait hydrologique lié à la présence des calcaires dans le secteur supérieur de la Jiu d'Ouest favorise le drainage souterrain des eaux de certaines petites rivières (Câmpu Mielului et Câmpușel) vers le bassin versant avoisinant de la rivière de Cerna [Savin, 2008]. En aval de Câmpu lui Neag, la Jiu d'Ouest draine une vallée sculptée en dépôts de conglomérats et argiles d'âge néogène, tandis que ses affluents (Valea de Pești, Braia, Mierleasa) drainent des formations plus anciennes, généralement dominées par des schistes epimétamorphiques protérozoïques.

Au sud de ce premier sous-secteur s'étale le massif de Retezat, dont l'altitude maximale est atteinte dans le Massif de Retezat sur le pic de Peleaga (2509 mètres). Les formations lithologiques de ce massif sont représentées par des granits et schistes cristallins d'épizone, tandis qu'à l'est, dans le massif de Retezatul Mic, les rivières ont sculpté leurs vallées dans des calcaires jurassiens, qui diminuent les valeurs des coefficients du ruissellement en favorisant l'alimentation des eaux souterraines. La fragmentation du relief est de 300-600 mètres et la pente moyenne de la surface du bassin atteint des valeurs très élevées, de 300-400 m/km [Morariu 1959 ; Morariu *et al.*, 1960].

Un deuxième sous-secteur montagneux, correspondant au bassin de la Jiu de l'Est, dont le relief est plus haut et massif, développé notamment sur des roches métamorphiques (en principal des micaschistes et des paragneisses), résistantes à l'érosion [Morariu, 1959]. Dans la dépression de Hațeg, les calcaires crétaciques font leur apparition à jour, sous la forme d'une bande orientée du nord-est vers le sud-ouest et favorise la présence du relief karstique (e.g. les gorges de la rivière Taia, affluent de la Jiu de l'Est. Les altitudes y dépassent fréquemment 2000 m, avec le maximum de tout le bassin de la rivière Jiu, de 2519 m dans le pic Parângul Mare (Mândra).

Les altitudes moyennes se maintiennent entre 1300-1350 mètres et la fragmentation du relief varie entre 700-900 mètres [Morariu, 1959]. Le réseau hydrographique est très bien développé, atteignant une densité élevée de 0,8-0,9 km/km<sup>2</sup> [Morariu *et al.*, 1969].

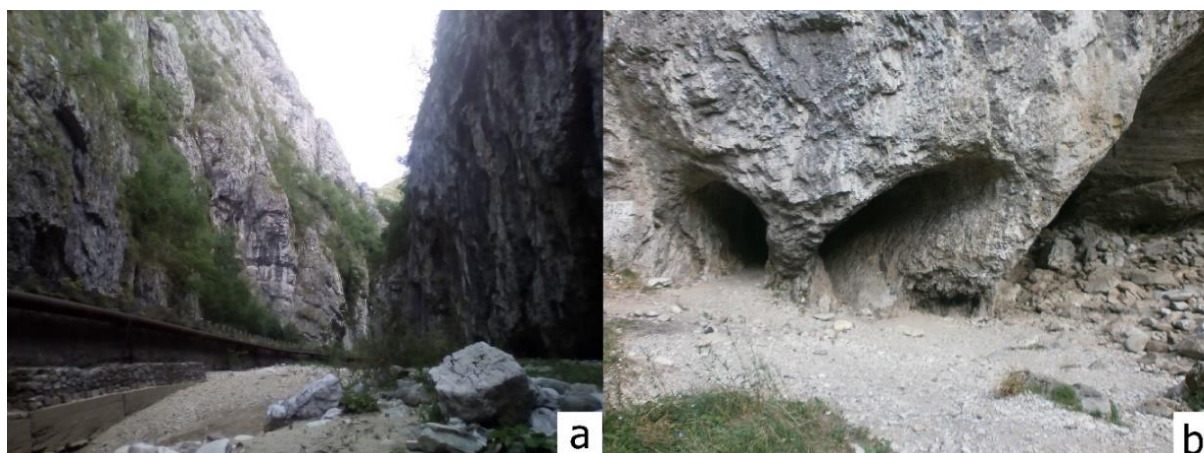
Du point de vue morphologique, le Massif du Parâng présente des hautes crêtes, avec des versants abrupts et un relief glaciaire bien développé, sous forme de cirques, lacs glaciaires, des vallées en forme de la lettre « U », des moraines, etc. Cette caractéristique change dans le sud du massif, où le relief glaciaire est remplacé par des vastes surfaces d'érosion, développées sous la forme des marchés, qui finissent, vers le nord-ouest, avec des collines au structure monoclinale et un relief de cuesta avec des surfaces structurales étagées [Cotet et Martiniuc, 1960; Iancu, 1964]. La présence des calcaires dans la vallée de Jieț a déterminé la formation du relief exo-karstique (e.g., des gorges).

Un autre sous-secteur de la région montagneuse correspond à la dépression de Petroșani, la plus large dépression intra-montagneuses des Carpates Méridionales. Elle est bordée au nord par les massifs de Șureanu et Retezatul Mic et, au sud, par les Monts de Vâlcan et de Parâng. Son secteur oriental est drainé par la Jiu d'Est et celui occidental par la Jiu d'Ouest. Cette dépression est un bassin de nature post-tectonique, remplie avec des dépôts alluvionnaires et proluviaux (conglomérats, sables, grés, argiles, intercalées avec du charbon). La surface morphologique est fortement fragmentée par des vallées avec des terrasses et des cônes de déjection. L'énergie de relief est de 500-1000 mètres, favorisant la concentration rapide des eaux écoulés sur les versants [Morariu, 1959 ; Morariu *et al.*, 1960].

Les secteurs sud-ouest et sud-est de la zone montagneuse sont développés sur un mosaïque lithologique, qui englobe une alternance de roches métamorphiques et des calcaires à l'ouest des sources de la rivière de Motru (granites, granitoïdes, phyllithes, schistes sericito-chloreuses, et des marno-calcaires, grés et conglomérats jurassiens), tandis qu'entre les vallées de la Motru et de la Jiu, il y a une prédominance des schistes epimétamorphiques protérozoïques au nord et des granites et calcaires au sud [Mutihac *et al.*, 2003].

A l'extrémité méridionale du secteur montagneux, suite à l'apparition des calcaires et de conglomérats jurassiens, les vallées des cours supérieures des affluents de Tismana (Runcu/Jaleș et Orlea)

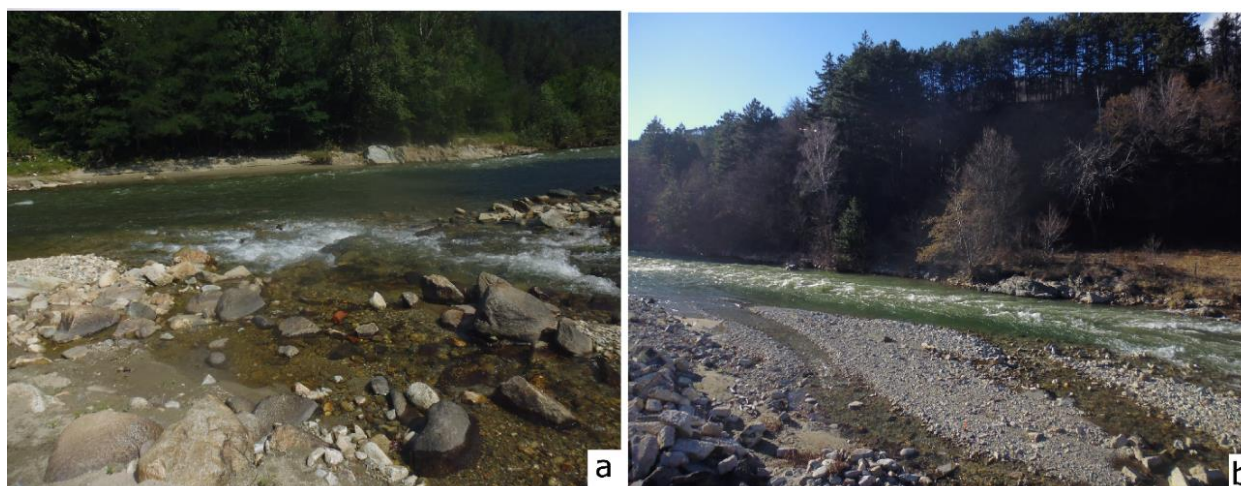
présentent des gorges et des formes karstiques (*Figure III.8*). Le réseau hydrographique des massifs montagneux du nord de la dépression de Petroșani et des versants nordiques des massifs de Retezat et Parâng est tributaire aux Jiu d'Ouest et Jiu d'Est, tandis que les versants de sud représentent la zone d'origine des principaux affluents de la Jiu (les rivières de Motru, Tismana, Bistrița – dans le Massif de Retezat, et la rivière de Gilort dans le Massif de Parâng).



**Figure III.8.** Secteur de gorges dans la vallée de Sohodol dans le secteur supérieur de la rivière de Runcu (aout 2017): **a.** vallée type canyon ; **b.** système de caves (nommé « Les narines ») (clichés : Moroșanu, 2017)

Dans son ensemble, le secteur montagneux du Jiu présente une densité élevée des cours d'eau, de 0,6-0,7 km/km<sup>2</sup>, mais sur le versant de sud, à cause du relief calcaire, la densité se réduit à 0,4-0,5 km/km<sup>2</sup>.

Entre Petroșani et Bumbești la rivière Jiu a creusé un secteur de gorges d'environ 33 km de longueur qui séparent les massifs de Retezat (à l'ouest) et Parâng (à l'est). Dans ce secteur, le lit de la Jiu présente des nombreuses ruptures de pente et il est pavé avec des gros galets, qui montrent une compétence de transport élevée de la rivière (*Figure III.9.a*).



**Figure III.9.** La vallée de la rivière Jiu dans le secteur des gorges : **a.** Secteur avec le lit pavé des galets ; **b.** La rivière Jiu à la sortie des gorges, vers la Dépression subcarpatique de Târgu Jiu (clichés : Moroșanu, 2016)

La vallée est creusée dans des roches dures, comme les schistes epimétamorphiques protérozoïques et les granites mésozoïques – paléozoïques. Vers le sud, le secteur montagneux s'achève brusquement au contact avec les dépressions et la zone collinaire des Subcarpates Gétiques (*Figure III.9.b*).



### 3.4.3. Le secteur subcarpatique

Au sud du secteur montagneux s'étalent les Subcarpates Gétiques qui sont séparés des montagnes par un escarpement bien évident et par une différence altimétrique de 300-400 m. Le contact Carpatés – Subcarpates se réalise par une série de dépressions sous-montagnes. Vers le sud, les Subcarpates sont bordés par une deuxième série de dépressions qui font le passage vers le Piémont Gétique. Selon la régionalisation géomorphologique de la Roumanie, réalisée par Posea (1974, 1980), le secteur subcarpatique du bassin de la Jiu appartient aux Subcarpates du Gorj, sous-unité des Subcarpates de l'Olténie. La zone subcarpatique a un fond cristallin couvert de formations sénoniennes, paléogènes et néogènes représentées par des conglomérats des sables gris et de marbre ; à la surface il y a de sable et du gravier mio-pliocène qui se continuent dans la plaine [Savin, 2008].

La région subcarpatique est caractérisée par des altitudes moyennes de 300-400 m, qui vont jusqu'à près de 700 m au contact avec la zone montagneuse. La profondeur moyenne de la fragmentation est de 100-200 m, avec des valeurs maximales de 250-300 m [Cotet et Martiniuc, 1960]. Le relief des Subcarpates est constitué par une alternance de dépressions (avec des terrasses et des zones basses alluvionnaires), bordées par des collines assez fragmentées, qui correspondent à des anticlinaux avec une lithologie dominée par des conglomérats, les grès et les schistes argileux protérozoïques. Les aires dépressionnaires correspondent aux synclinaux larges, remplis des dépôts du pliocène et du quaternaire (sables, graviers, argiles rouges). Au contact avec les montagnes, il y a des argiles marneuses, sables et graviers datant du néogène.

Au nord, les dépressions (sous-montagneuses) s'étalent au pied des Carpatés, sur la ligne des localités de Tismana, Peștișani, Bumbești et Novaci. Une deuxième série de dépressions (intra-collinaires) correspond à des zones de convergence hydrographique, comme Târgu Jiu et Cărbunești (**Figure III.10.a et b**). Entre ces deux couloirs dépressionnaires orientés de l'ouest à l'est, il y a une série de collines orientées du nord au sud (par exemple, les collines de Sporești, Târgului, Ciocadia).



**Figure III.10.** Relief dépressionnaire subcarpatique : **a.** Vallée de la Gilort dans la dépression de Novaci (février 2016); **b.** Vallée de la Jiu dans la dépression de Târgu Jiu (juin 2017) (clichés : Moroșanu, 2016 - 2017)

Vers le sud, les Subcarpates du Gorj finissent avec les collines de Bran et de Sârbești (**Figure III.7**). La densité du réseau hydrographique dans le secteur subcarpatique est de 0,5-0,6 km/km<sup>2</sup>, atteignant 0,7 km/km<sup>2</sup> dans la dépression de Târgu Jiu, une aire de convergence hydrographique.

### 3.4.4. Le plateau de Mehedinți

Le plateau de Mehedinți est une zone intermédiaire entre les montagnes et les collines, situé dans l'extrémité nord-ouest du bassin de la Jiu (**Figure III.11**). La caractéristique définitoire de cette unité est donnée par sa constitution pétrographique similaire avec celle des Carpates, mise en évidence par la présence des roches dures, comme les micaschistes et les paragneisses, en alternance avec les calcaires, marno-calcaires et conglomérats jurassiens et crétacés, qui ont favorisé le développement du relief karstique, avec des formes, intérieures et extérieures. Le complexe karstique de Ponoarele est renommé par la variété des formes développés sur les calcaires : le Pont de Dieu (le seul pont naturel de Roumaine – **Figure III.11.a**), des dolines, des lapiaz (le Champ des lapiaz – **Figure III.11.b**), des lacs karstiques temporaires (Zătonul Mare et Zătonul Mic – **Figure III.11.c**), des caves (la cave de Ponoarele – **Figure III.11.d**).



**Figure III.11.** Relief typique développé sur des calcaires dans le Plateau de Mehedinți: **a.** Pont naturel karstique, connu sur le nom de « Pont de Dieu », utilisé comme voie routière; **b.** Champ des lapiaz ; **c.** Le système de lacs karstiques (le lac Zăton) en période sèche (on peut distinguer la cuvette seulement), délimité par la ligne bleue ; et **d.** la cave de Ponoarele (connecte les deux lacs temporaires, Zătonul Mic et Zătonul Mare) (clichés : Moroșanu, 2018)

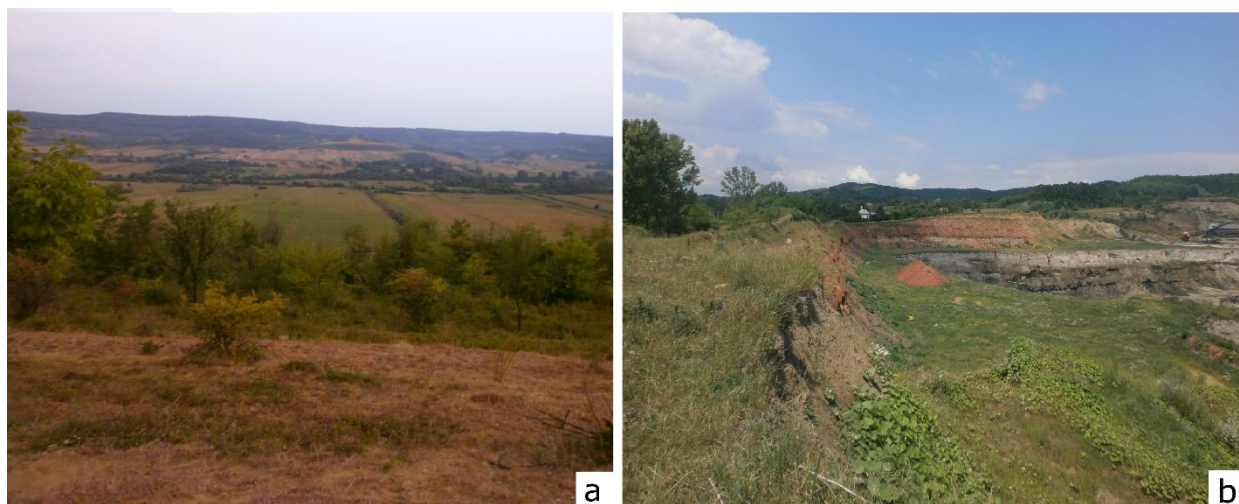
L'altitude moyenne du plateau varie entre 600-700 m atteignant 885 m dans le pic Paharnicului. L'énergie de relief est de 300-500 m et les pentes moyennes des bassins ont des valeurs de jusqu'au 150m/km. Les rivières qui drainent le Plateau de Mehedinți appartenant au bassin de la Jiu sont courtes, ayant leurs sources dans les montagnes avoisinantes. La rivière la plus importante est la Coșuștea, un affluent de droite de la Motru. Le réseau hydrographique englobe plusieurs vallées sèches, alimentées seulement dans la saison humide (les rivières de Brebina et Bulba). Par conséquent, vu l'extension importante des calcaires, la densité du réseau hydrographique diminue jusqu'au 0,3-0,4 km/km<sup>2</sup>.



### 3.4.5. Le Piémont Gétique

Dans le bassin de la Jiu, le Piémont Gétique s'étale entre les Subcarpatés Gétiques, au nord, le Plateau de Mehedinți à l'ouest, la Plaine de l'Olténie au sud et la ligne de partage des eaux qui sépare le bassin de la Jiu de celui de l'Olt, à l'est.

La rivière Jiu, avec ses affluents (les rivières de Motru, Huşniţa, Argetoaia, Jiłţ sur la partie droite, et Gilort et Amaradia, sur la partie gauche) partagent le Piémont Gétique en plusieurs sous-unités : les Collines de la Jiłţ, les Collines de la Jiu (Gruiurile Jiului), les Collines de la Coşuştea, les Collines de l'Amaradia, le Plateau de Teslui (*Figure III.12.a et b*).



**Figure III.12.** Relief collinaire dans le Piémont Gétique : **a.** Les collines de Coşuştea (mai 2016); **b.** Les collines de Jiłţ dans la zone d'exploitation du lignite (juin 2017)

Le Piémont Gétique est formé des dépôts sédimentaires quaternaires, amenés par les rivières carpatiques à partir du début du Sénonien [Savin, 2008]. Une fois remplie le lac moessique devant les Carpatés, les sédiments y déposés ont été élevés et fragmentés (englobant de grés, conglomérats, graviers, calcaires, argiles, roches généralement friables et perméables) [Răileanu *et al.*, 1960]. Dans la partie du nord (les secteurs supérieurs des bassins hydrographiques de la Jiłţ et de l'Amaradia), il y a aussi des sables, argiles et marnes plus anciennes (d'âge néogène), englobant des couches de lignite.

Les altitudes moyennes sont de 300-400 m dans le sud et 500-600 m au nord. Dans le cadre du Piedmont Gétique, on peut distinguer, du point de vue morphologique, deux secteurs : le secteur de piedmont collinaire (au nord) et celui de la plaine collinaire (au sud).

Le premier secteur correspond à la partie la plus haute du piémont et se caractérise par l'épigenèse et l'antécédence des vallées, ainsi que par les dépressions entre les collines situées au contact avec les Subcarpatés. Les vallées sont en général étroites, mais par endroits sont larges, avec des terrasses, tandis que les versants sont affectés par des glissements et torrentialité. L'énergie de relief est relativement élevée, de 200-300 m [Cotet et Martiniuc, 1960].

Le deuxième secteur à des altitudes moyennes de 200-300 m, une fragmentation réduite du relief, une énergie du relief de 50-100 m et des interfluves larges, peu ondulé ou plans, ayant une inclinaison de 5-6 m/km.

Le réseau hydrographique a une densité d'environ 0,4 km/km<sup>2</sup> et le relief d'accumulation fluviale et lacustre est faiblement fragmenté. Les plaines inondables des rivières, en particulier celle de la Jiu, ont des gros dépôts d'alluvions terrassés, parfois couverts de lœss [Badea *et al.*, 1984].

### 3.4.6. Le secteur de plaine

Le relief de la plaine est faiblement représenté dans le cadre du bassin versant du Jiu dans son extrémité au sud, au long d'une bande étroite de maximum 40 km le long de la rivière Jiu. Il correspond à la Plaine de l'Olténie, sous-unité de la Plaine Roumaine. C'est un relief bas d'accumulation fluviale, lacustre et éolienne, avec une fragmentation réduite et un microrelief formé par des cénotes et des dépressions lacustres. Du point de vue lithologique, la région est caractérisée par la présence des dépôts quaternaires englobant des marnes, sables, grés et graviers, couverts par une couche de lœss. Sur la rive droite, les dépôts de lœss sont dominants, tandis que sur la rive gauche, les sables, les graviers et les argiles rouges quaternaires sont plus répandus, et le lœss. La densité du réseau hydrographique est très faible (inférieure à 0,1 km/km<sup>2</sup>), représentée par le cours inférieur de la rivière Jiu et quelques rivières temporaires, sans écoulement pour la plupart de l'année. La Jiu développe une plaine d'inondation large, vulnérable aux inondations pendant les crues (*Figure III.13*).



**Figure III.13.** Relief de plaine au long de la rivière Jiu: **a.** La plaine dans le secteur inférieur aval Craiova (juillet 2017); **b.** Le champ d'inondation de la Jiu en aval de Zăval, avec une ouverture de dépôts de lœss sur le front de la terrasse (février 2016)

L'altitude maximale du relief atteint 172 m dans le champ de Leu – Rotunda, alors que les plus basses valeurs sont inférieures à 50 m au niveau de la plaine inondable, avec le minimum de 27 m à l'embouchure de la Jiu.

### 3.5. Particularités climatiques

Par la position du bassin de la rivière Jiu dans le sud-ouest de la Roumanie, entre la chaîne des Carpates au nord et nord-ouest, la Plaine Roumaine et la Vallée du Danube au sud, ainsi que par son positionnement face aux principaux types de circulation générale de l'atmosphère (de l'ouest de l'Europe, méditerranée), le climat s'encadre dans le type général tempéré – continental, avec des influences méditerranéennes et de variations imposées par l'altitude.

### 3.5.1. Données et méthodes

L'analyse climatique a porté sur la variabilité des principaux paramètres contrôlant les flux-hydro-sédimentaire débit des cours d'eau, à savoir les températures de l'air (importantes en particulier en période de sécheresse par son influence sur l'évaporation) et les précipitations (facteur déterminant du régime de l'écoulement liquide et solide des rivières). L'analyse climatique est basée sur des méthodes statistiques et de représentation graphique appliquées aux données enregistrées aux 13 stations météorologiques, dont 7 se trouvent à l'intérieur même du bassin de la rivière Jiu et 6 dans ses environs (**Tableau III.2**). La période d'étude est comprise entre 1961 et 2013. Les valeurs journalières de ces variables climatiques ont été extraites de la base de données *ROCADA* [Dumitrescu et Bîrsan, 2014] et pour comparaison avec celles mesurées, la station météorologique Craiova a été utilisée (avec des données pour la même période, extraites de la plateforme européenne *ECAetD*<sup>3</sup>). Afin de vérifier la relation précipitation – débit liquide, des indices spatiaux des précipitations résultant d'une analyse préalable d'homogénéité et d'interpolation dans le cadre du projet ROCADA ont été utilisés pour chaque bassin versant correspondant aux stations hydrométriques principales [Dumitrescu et Bîrsan, 2014].

**Tableau III.2.** Les stations météorologiques utilisées dans l'analyse climatique du bassin hydrographique de la rivière Jiu et les données caractéristiques (période 1961 – 2013, source : ANM)

No.	Nom station	Altitude (m)	Température moyenne multiannuelle (°C)	Précipitations annuelles (mm)	Lat.	Long.
<i>Stations météorologiques situées à l'intérieur du bassin de la rivière Jiu</i>						
1	Craiova	192	10.8	584	44° 26'	24° 22'
2	Târgu Jiu	201	10.4	701	45° 02'	23° 16'
3	Padeș	259	10.4	825	45° 00'	22° 52'
4	Târgu Logrești	263	10.2	720	44° 53'	23° 42'
5	Băcleș	311	10.1	645	44° 28'	23° 6'
6	Petroșani	604	7.1	810	45° 24'	23° 22'
7	Parâng	1534	6.4	928	45° 23'	23° 28'
<i>Stations météorologiques autour du bassin de la rivière Jiu</i>						
8	Bechet	36	11.5	516.6	43° 47'	23° 57'
9	Băilești	56	11.6	545	44° 2'	23° 2'
10	Drobeta Tr. Severin	68	11.6	636	44° 37'	22° 37'
11	Polovragi	526	8.3	817	45° 10'	23° 48'
12	Obîrșia Lotrului	1341	3.17	1245.6	45° 26'	23° 37'
13	Țarcu	2154	4.1	1015	22° 32'	45° 17'

A part les 7 stations situées dans le bassin de la rivière Jiu (Craiova, Băcleș, Târgu Logrești, Târgu Jiu, Padeș, Petroșani, Parâng), nous avons utilisé 6 autres stations météorologiques situées dans sa proximité (Bechet, Băilești, Drobeta Turnu Severin, Polovragi, Țarcu et Obîrșia Lotrului), afin de réaliser les corrélations entre leur altitude et les deux principaux paramètres climatiques analysés (la température moyenne annuelle de l'air et les précipitations annuelles). Pour les représentations graphiques, nous avons retenu 6 des 7 stations météorologiques du bassin de la rivière Jiu (Craiova, Târgu Logrești, Padeș, Târgu Jiu, Petroșani, Parâng) et deux stations très proches de la limite du bassin, afin de mettre en évidence d'envisager les caractéristiques climatiques représentatives pour toutes les conditions d'altitude et de climat pouvant être rencontrées à l'intérieur du bassin. Ainsi, nous avons considéré dans les analyses considéré dans les analyses la station Bechet (représentative pour la zone de très basse altitude du bassin inférieur de

<sup>3</sup> [Site de la Base de Données Climatiques Européennes](#)

la Jiu) et Obârșia Lotrului (une station qui, même située à une altitude inférieure à la station Parâng, est localisée sur le versant oriental des Monts Parâng, et reflète des particularités climatiques de cette côté de la région montagneuse, pouvant jouer un rôle plus important dans le régime des débits liquides).

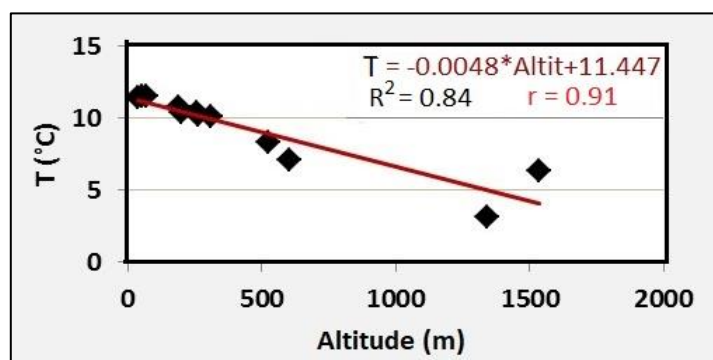
### 3.5.2. Variabilité de la température de l'air

La température de l'air est un facteur important pour les processus hydrologiques, car elle conditionne les phénomènes météorologiques extrêmes, avec des effets sur la variabilité de l'écoulement des rivières (e.g. les températures élevées entraînent l'augmentation de l'évaporation et leur permanence conduit à l'occurrence ou à l'accentuation du phénomène de sécheresse, tandis que des températures négatives favorisent la formation des phénomènes de gel sur les rivières).

L'influence de la température de l'air sur l'écoulement se manifeste durant toute l'année, soit par la diminution des débits pendant l'été, conséquence de l'intensification de l'évaporation, ou pendant l'hiver, quand une grande partie des ressources en eau disponibles à l'écoulement sont en état solide sous forme de neige ou de glace, soit par l'augmentation des débits. Les débits et les volumes d'eau transportés par les rivières sont maximales généralement pendant le printemps, quand l'instabilité thermique entraînant des masses de l'air humides avec des précipitations importantes s'installe sur le fond de la fonte des neiges.

#### 3.5.2.1. Variabilité de la température à l'échelle multiannuelle

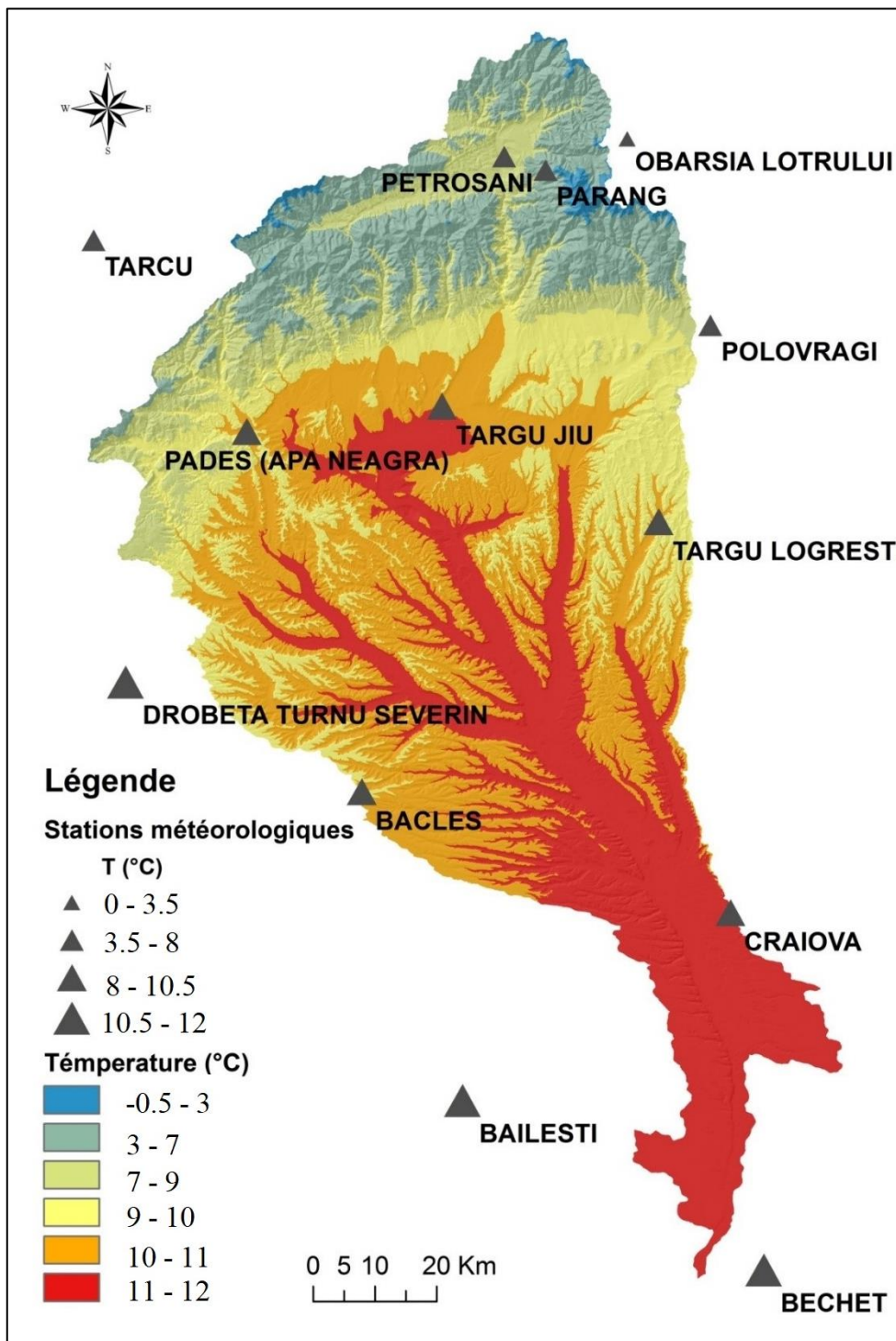
Une première étape dans l'analyse de la variation spatiale de la température moyenne multi-annuelle a été d'établir une corrélation entre les valeurs moyennes de toutes les stations étudiées et l'altitude à laquelle elles sont situées. Différentes fonctions ont été testées pour identifier le coefficient de corrélation le plus élevé. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour la régression linéaire, avec un coefficient de corrélation  $r = 0,91$ , comme le montre la **Figure III.14**.



**Figure III.14.** Corrélation entre la température moyenne multiannuelle et l'altitude des stations météorologiques analysées. Toutes les 13 stations ont été utilisées pour obtenir la régression

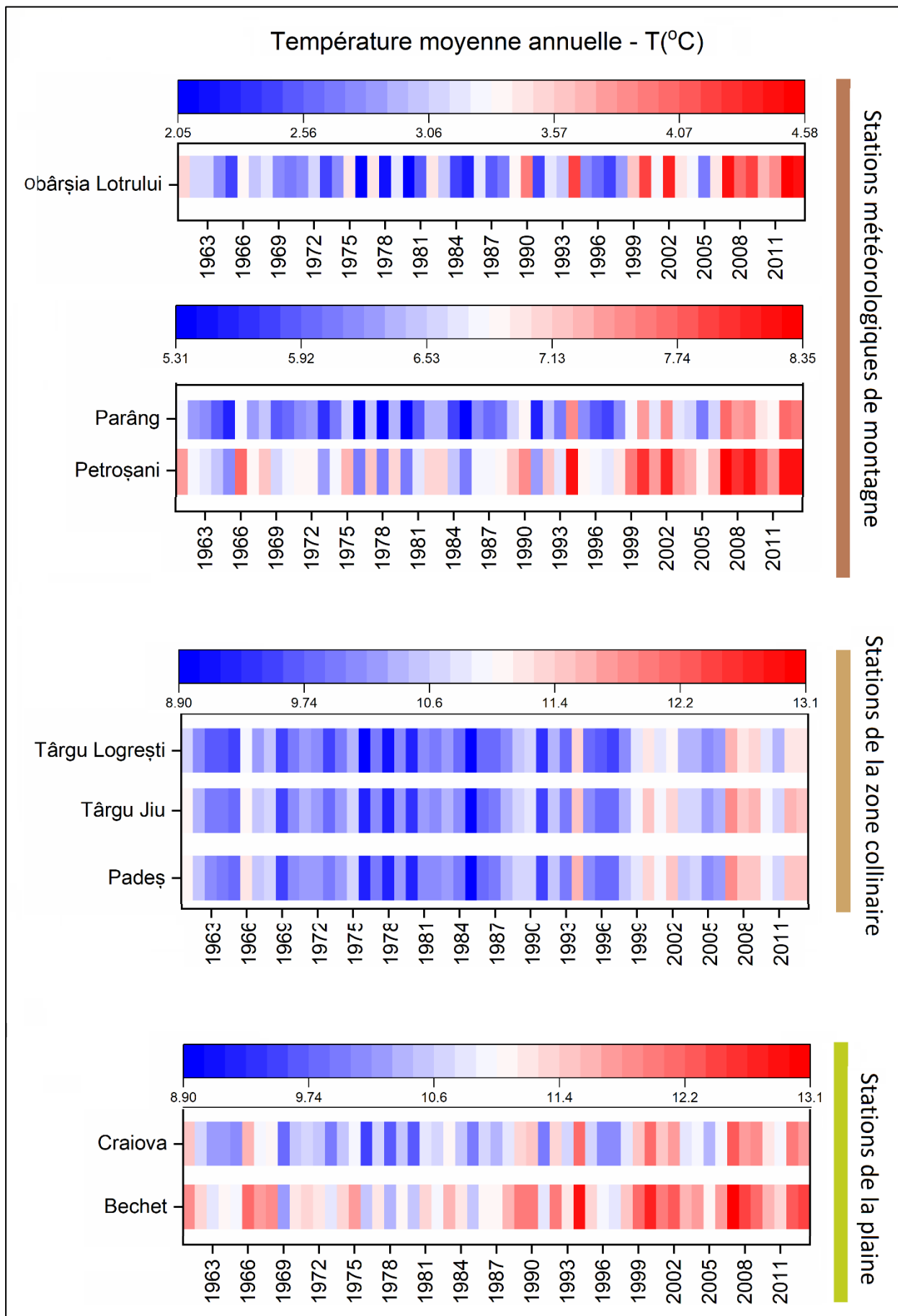
Selon la méthode détaillée par *Chendes (2011)*, l'équation de la corrélation a été utilisée ensuite en environnement SIG pour calculer les valeurs de température en fonction du modèle d'altitude du terrain et pour réaliser la carte de répartition spatiale des températures moyennes annuelles de l'air dans le b.v. de la rivière Jiu (**Figure III.15**). Son analyse montre que sur l'ensemble du bassin, ces températures baissent de  $10^{\circ} - 11^{\circ} \text{ C}$  dans les régions basses à moins de  $3^{\circ} \text{ C}$  dans les Carpates.





**Figure III.15.** Variation spatiale de la température moyenne annuelle de l'air dans le bassin de la rivière Jiu

L'analyse de la variabilité des températures moyennes annuelles enregistrées aux 8 stations analysées (dont 7 à l'intérieur du bassin et une – Obârșia Lotrului – dans la proximité) dans la période 1961 – 2013 montre les différences thermiques entre les stations et une tendance à l'augmentation après les années 2000, qui peut être considéré une indication des changements climatiques survenus au cours des dernières décennies dans la région étudiée (*Figure III.16*).

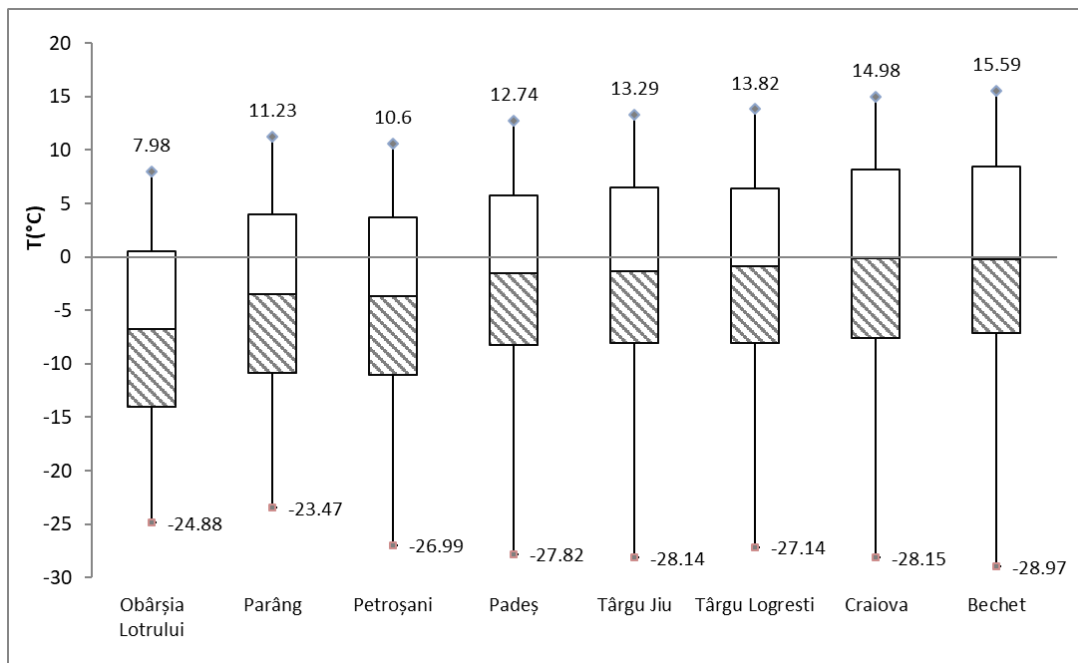


**Figure III.16.** Variabilité des températures moyennes annuelles (1961 – 2013) aux stations situées dans le b.v. de la rivière Jiu

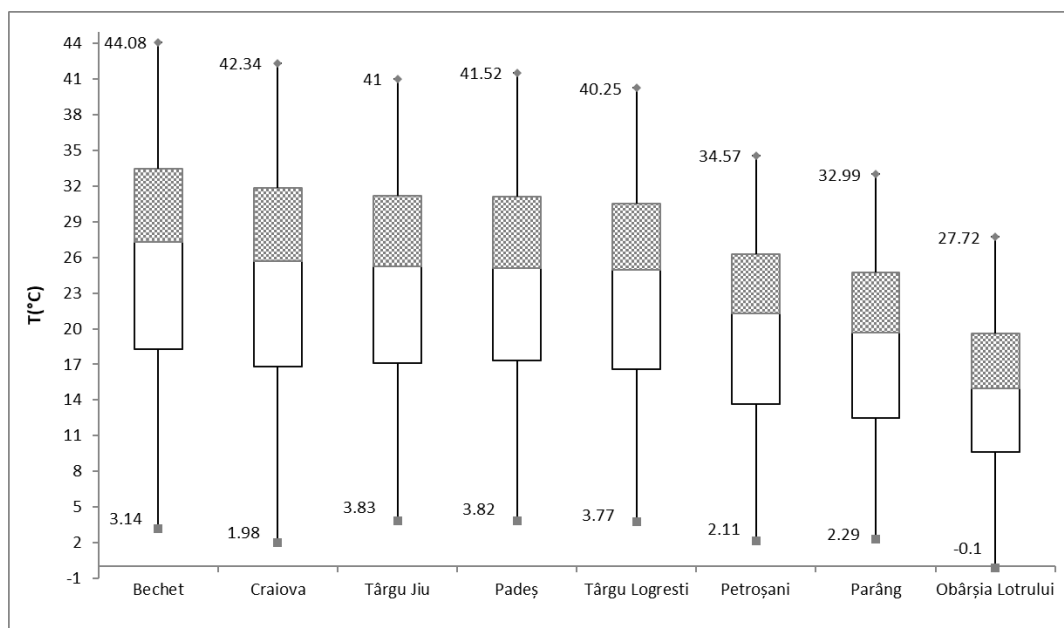
La variabilité spatiale des températures minimales et maximales de l'air aux stations météorologiques situées dans le b.v. de la rivière Jiu est illustrée dans les **Figures III.17** et **III.18**. Ces



valeurs ont été calculées à partir des températures moyennes journalières de la période d'analyse (1961 – 2013).



**Figure III.17.** Boîte à moustaches des températures minimales (calculées à partir des températures moyennes journalières de la période 1961 – 2013)



**Figure III.18.** Boîte aux moustaches des températures maximales mensuelles (calculées à partir des températures moyennes journalières de la période 1961 – 2013)

Afin d'identifier l'existence des tendances dans la variabilité des températures de l'air moyennes, maximales et minimales dans le bassin de la rivière Jiu, ainsi que leur significativité statistique, nous avons utilisé le test de Mann-Kendall et Sen's slope, une méthode robuste d'identification des tendances dans l'évolution des paramètres environnementaux [Sen, 1968]. Nous notons que, en effet, il y a eu des tendances positives pour toutes les 8 stations, pour presque tous les trois paramètres considérés. Les tendances les plus fortes ont été enregistrées pour les températures moyennes avec des niveaux élevés de significativité ( $\alpha=0,001$ ) aux stations de Craiova, Obârșia Lotrului, Parâng et Petroșani. En ce qui concerne les températures maximales, la tendance a été obtenue pour la station d'Obârșia Lotrului, avec les plus élevés niveaux de significativité parmi les stations météorologiques considérées. Cette dernière station a été la

seule à avoir enregistré une petite tendance d'augmentation des températures minimales annuelles à  $\alpha=0,05$  niveau de significativité statistique (**Tableau III.3**).

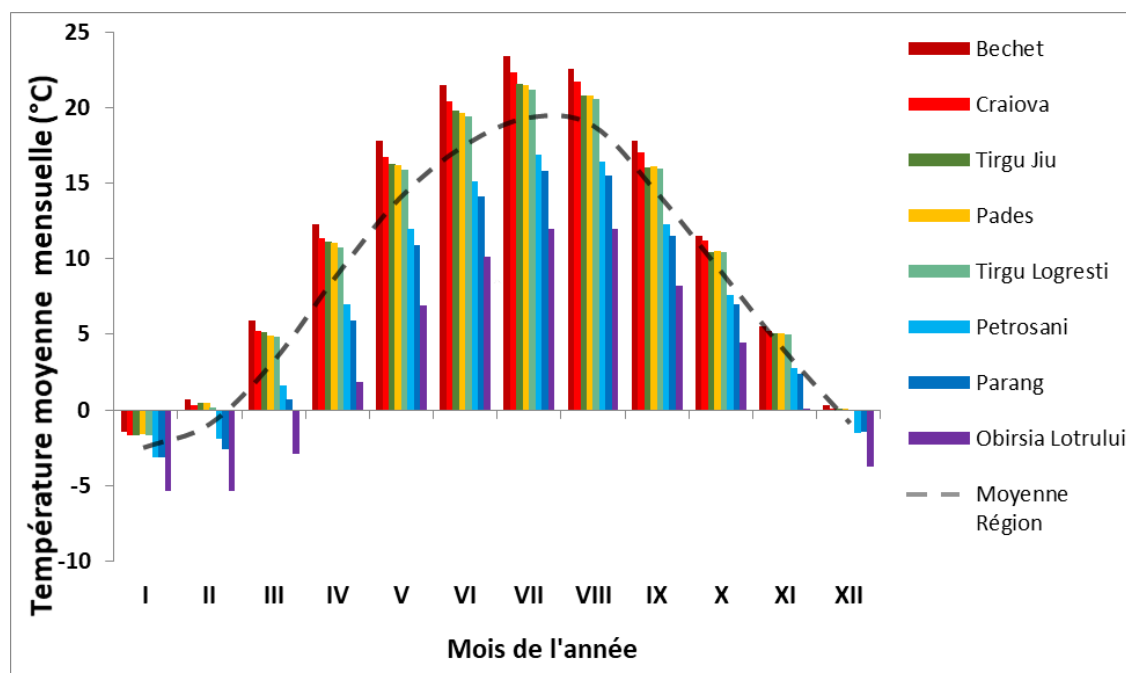
**Tableau III.3.** Tendances des températures de l'air moyennes, maximales et minimales multiannuelle, selon le teste de Mann – Kendal (1961 – 2013)<sup>4</sup>

Station Météorologique	Température moyenne		Température maximale		Température minimale	
	Teste Z	Signif.	Teste Z	Signif.	Teste Z	Signif.
Bechet	3.28	**	2.36	*	-0.74	
Craiova	3.61	***	1.90	+	0.33	
Obîrșia Lotrului	3.46	***	3.41	***	2.00	*
Padeș	3.15	***	3.04	**	-	
Parâng	3.80	***	2.95	**	1.24	
Petroșani	4.03	***	3.12	**	0.77	
Tîrgu Jiu	3.28	***	2.56	*	0.71	
Tîrgu Logrești	3.28	***	2.39	*	0.02	

Notons que \*\*\* s'applique si la tendance à un  $\alpha = 0.001$  ; \*\* si  $\alpha = 0.01$  niveau de signification ; \* si tendance  $\alpha = 0.05$  et + si tendance à  $\alpha = 0.1$  niveau de significativité statistique ; si aucun signe n'apparait au droit de la valeur du test Z, la tendance n'est pas statistiquement significative ; si manque de valeur et de signe (-), aucune tendance n'a pas été identifiée pour la série en cause ; les valeurs positives indiquent la tendance d'accroissement et celles négatives de baisse.

### 3.5.2.2. Régime annuel des températures de l'air

Du point de vue thermique, en considérant les températures moyennes mensuelles, les mois extrêmes sont juillet, pour les températures maximales, et janvier, pour des températures minimales (**Figure III.19**). En général, les stations *Bechet*, *Craiova*, *Târgu Jiu*, *Padeș* et *Târgu Logrești*, ont des valeurs thermiques supérieures à la courbe moyenne pour toute la région, tandis que les stations *Petroșani*, *Parâng* et *Obârșia Lotrului*, situées dans la zone de montagne, ont des températures inférieures à cette courbe.



**Figure III.19.** Variation des températures moyennes mensuelles dans la région d'étude (1961 – 2013)

Les résultats du test Mann-Kendall pour identifier les tendances des températures moyennes (**Tableau A2.1**), maximales (**Tableau A2.2**) et minimales (**Tableau A2.3**) sont présentés dans **l'Annexe 2**.

<sup>4</sup> Pour plus de résultats sur l'analyse de la variabilité des températures, veuillez consulter l'Annexe 2

En général, ces résultats montrent que les mois d'été sont caractérisés par les plus significatives tendances, surtout au niveau des températures maximales, conséquence de la hausse des températures au cours des mois les plus chauds les dernières décennies.

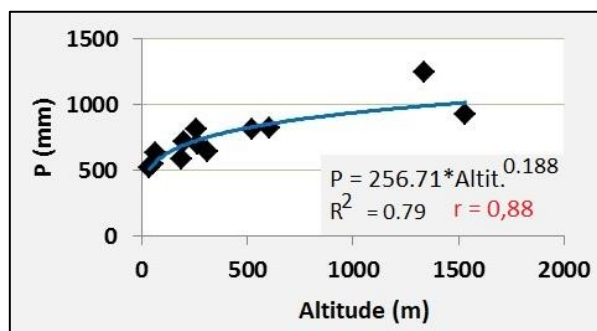
### 3.5.3. Variabilité des précipitations

La dynamique des flux liquides et solides est incontestablement liée à la variabilité des précipitations. Les fortes pluies sont responsables de l'augmentation des débits, notamment durant les crues, tandis que leur absence, dans les conditions d'une contribution souterraine limitée peut conduire à l'assèchement des rivières. Pour les débits solides, les précipitations présentent un grand intérêt, à la fois par leur influence sur le transport sédimentaire dans les lits des rivières, mais aussi les processus géomorphologiques qu'elles déclenchent sur les versants (e.g., ruissellement, ravines, glissements de terrain, etc.), surtout en l'absence de la végétation protectrice, processus qui sont des fournisseurs d'alluvions pour les rivières.

#### 3.5.3.1. Quantités annuelles et mensuelles des précipitations

Les quantités annuelles des précipitations les plus importantes (supérieures à 800 mm/an) sont enregistrées dans la région montagneuse, avec le maximum (927 mm) à Parâng (sans considérer les stations situées à l'extérieur du bassin de la rivière Jiu). Le phénomène de foehn sur les versants avec orientation méridionale détermine la diminution des précipitations vers les dépressions et les collines au pied de la montagne [Climat de la Roumanie, 2008]. Aux stations situées dans les dépressions, dans des zones orientées vers l'ouest, il y a des cumuls de précipitation relativement élevés (>800 mm/an à Petroșani – 810 mm et Padeș - 825 mm). Dans les zones de collines et de piémont les précipitations annuelles baissent à 600-800 mm (Bâcleș - 645 mm ; Târgu Logrești - 720 mm), tandis que dans le secteur de la plaine, les précipitations annuelles sont inférieures à 600 mm (Craiova - 584 mm) – **Tableau III.2** et **Figure III.21**.

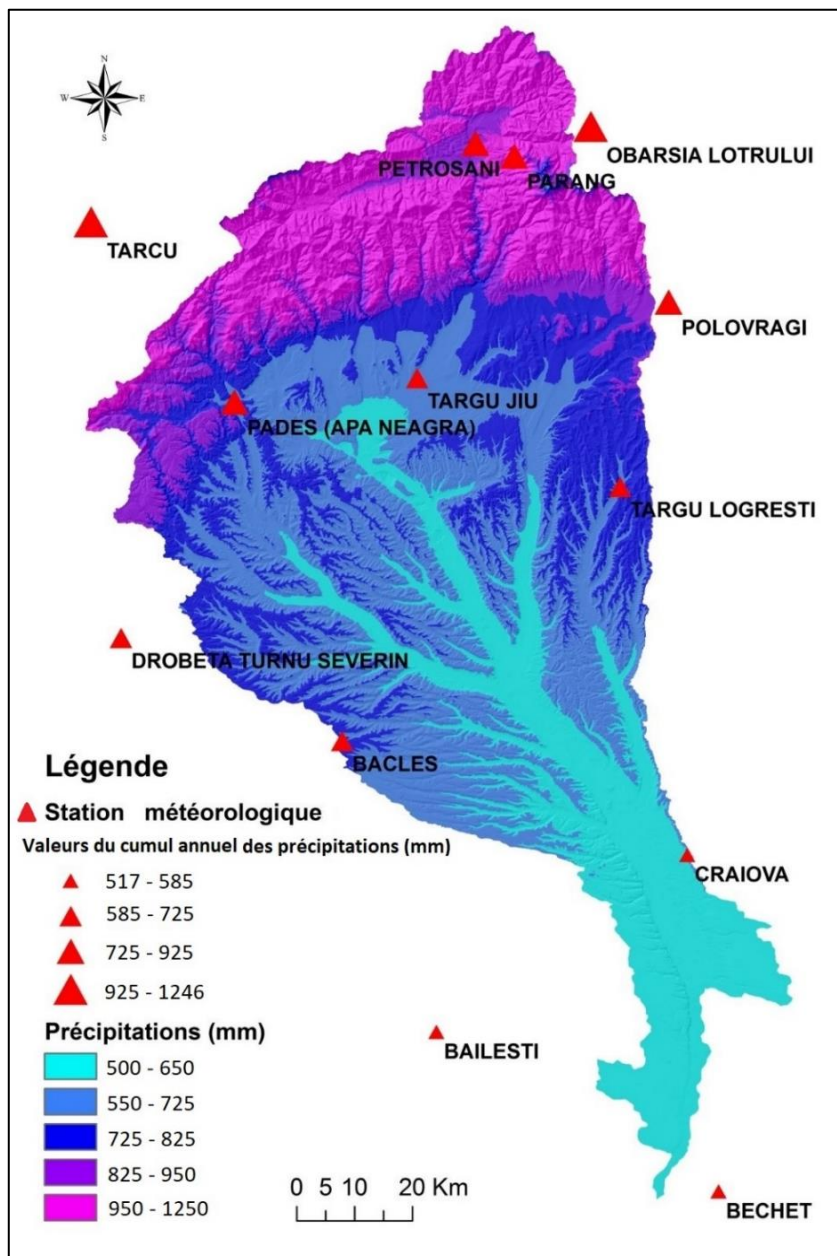
Afin de spatialiser les cumules annuels de précipitations dans le bassin de la rivière Jiu, nous avons testé la corrélation entre les quantités annuelles des précipitations (calculées comme moyenne sur la période 1961 - 2013) et l'altitude des stations. Un coefficient de corrélation „r” de 0,88 a été obtenu pour la fonction de type puissance (**Figure III.20**).



**Figure III.20.** Corrélation entre les précipitations annuelles (moyennes pour la période 1961 – 2013) et l'altitude des stations analysées

L'équation de la fonction a été appliquée pour spatialiser les précipitations annuelles en milieu SIG. La carte obtenue (**Figure III.21**) montre l'augmentation des précipitations du sud vers le nord de 500 – 650 mm/ an dans la plaine, à plus de 1000 mm/ an à la montagne. Dans les dépressions montagneuses, les précipitations annuelles cumulent entre 825 et 950 mm, ainsi que sur le plateau du massif Parâng, en dépit

de son altitude supérieure à 1500 m. Vers le nord, est et ouest de ce massif, les précipitations augmentent de nouveau, atteignant même plus de 1000 mm/ an.



**Figure III.21.** Répartition des précipitations annuelles (moyennes pour la période 1961 – 2013) dans le bassin de la rivière Jiu

A partir des précipitations mensuelles et annuelles de la période 1961 – 2013, nous avons analysé leurs tendances linéaires, en appliquant le teste de Mann – Kendall. Les résultats ont montré que seulement deux stations météorologiques ont enregistré des faibles tendances de baisse (en octobre) et de croissance (en novembre) à des niveaux de significativité statistique ( $\alpha$ ) 0,05 (s.m. de Craiova), respectivement 0,1 (s.m. de Bechet).

### 3.5.3.2. Précipitations maximales mensuelles

En ce qui concerne les quantités maximales mensuelles de précipitations (déterminées sur la base des précipitations journalières pour la période 1961 – 2013), elles sont concentrées pendant les mois d'été, avec des pics en juin et juillet (**Figure III.22**). Au niveau pluriannuel, trois périodes différentes du point de vue pluviométrique sont observées : (i) la première (les années '60 – 70) avec des pluies abondantes, (ii)

les décennies '80-'90 plus sèches, avec les pics les plus diminués, et (iii) la période d'après 2000, avec des précipitations maximales élevées.

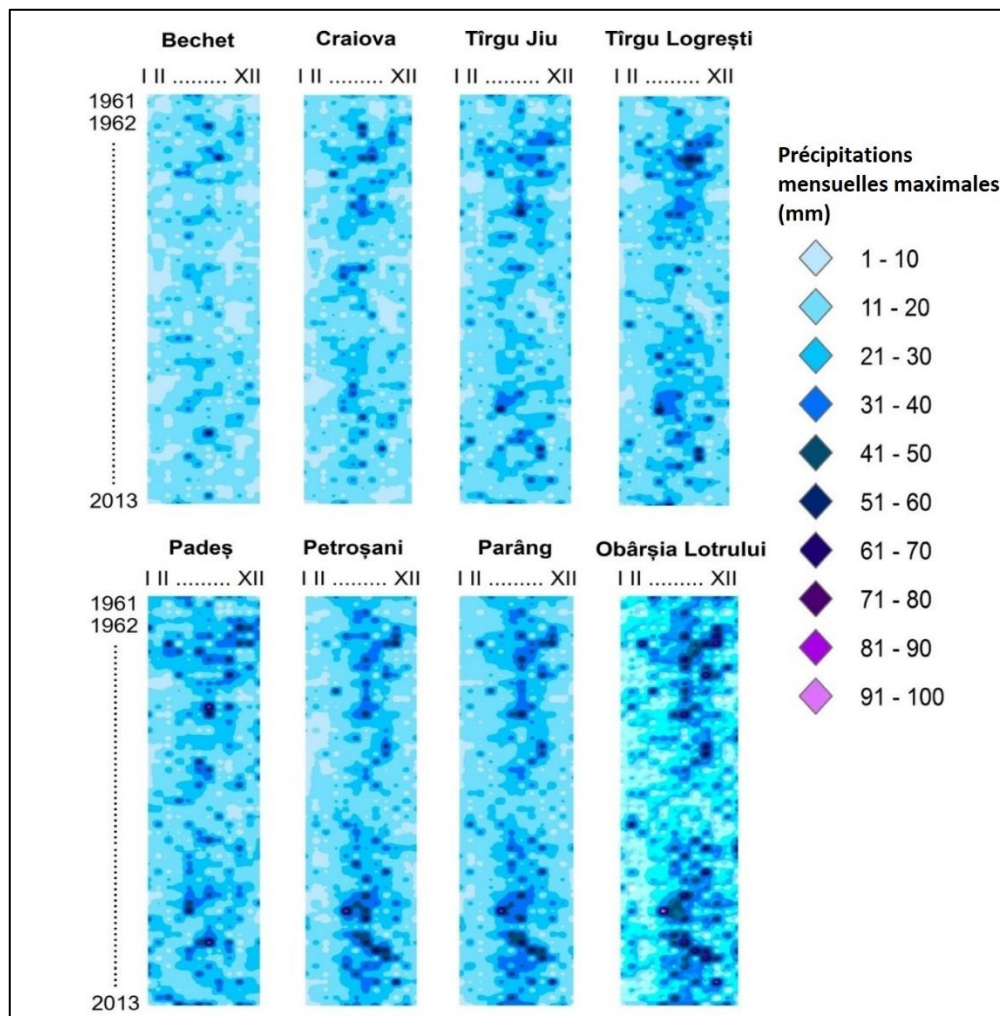


Figure III.22. Variation pluriannuelle des précipitations maximales mensuelles aux 8 stations étudiées (diagrammes obtenus par l'interpolation des valeurs mensuelles)

On peut également constater que, aux stations situées à plus basse altitude (s.m. Bechet, Craiova), la première période (avant les années '80) reste la plus pluvieuse. Au fur et à mesure que les altitudes augmentent, une seconde période caractérisée par des fortes précipitations est observée vers le début des années '2000 (2000-2005). À partir du cumul des précipitations mensuelles, une série d'analyses statistiques a été réalisée pour identifier les mois les plus pluvieux et pour déterminer ensuite les mois de plus grande fréquence de précipitations supérieures à 100 mm, avec un impact important sur les flux hydro-sédimentaires (Tableau III.4).

Tableau III.4. Données statistiques sur le maximum de précipitations mensuelles (P)

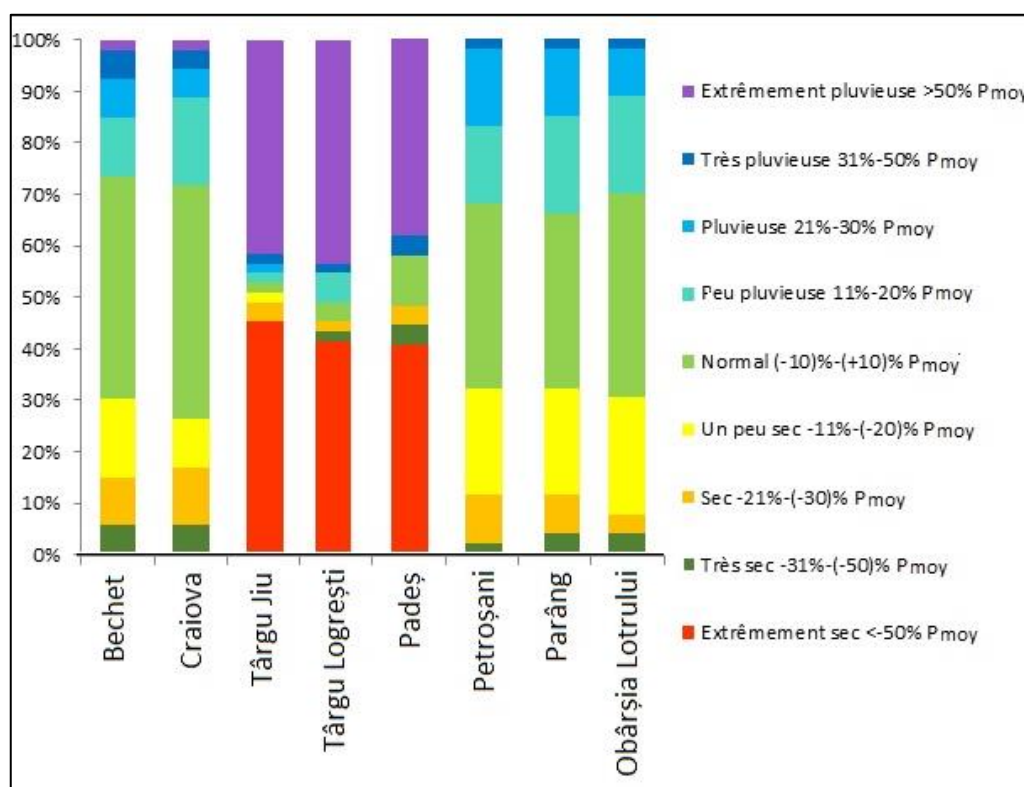
Stations météorologiques		Bechet	Craiova	Târgu Jiu	Padeș	Târgu Logrești	Petroșani	Parâng	Obârșia Lotrului
Mois de P>100 mm	No	32	57	91	135	90	137	167	287
	%	5.0	9.0	14.3	21.2	14.2	21.5	26.3	45.1
Ordre des mois de fréquence la plus haute de P>100 mm		VI, V, VII	VI, V, VII	VI, VII, V	VI, V, XII	VI, VIII, V	VI, VII, V	VI, VII, V	VI, VII, V
Cumul maximal absolu (mm)	Quand	août 2005	octobre 1972	octobre 1972	juillet 1999	octobre 1972	juillet 1972	juillet 1972	juillet 1972
	Combien	200,2	230,5	228,3	283,6	233,9	282,5	287,2	336,9



Les précipitations les plus élevées ont été enregistrées en octobre 1972, lorsque la crue la plus sévère du bassin de la rivière Jiu a eu lieu. Les mois de juin, mai et juillet sont généralement ceux avec les précipitations cumulatives dépassant 100 mm les plus fréquentes.

### 3.5.3.3. Analyse pluviométrique selon le critère de Hellmann

Afin de mettre en évidence la variabilité interannuelle des précipitations, nous avons utilisé le critère de Hellmann détaillé dans *l'Annexe 3*, suivant l'approche méthodologique de [Marinică \(2003 et 2006\)](#). Le critère de Hellmann indique le nombre des ans au caractère sec et très pluvieux, pour illustrer la susceptibilité du bassin à des phénomènes de sécheresse et de crue. Les résultats sont synthétisés dans la **Figure III.23**, qui met en évidence, en valeurs relatives (%), la fréquence des 8 types de régime pluvial aux 8 stations analysées.



**Figure III.23.** Fréquence des types des années pluviométriques aux stations analysées en fonction du critère de Hellmann

Les stations météorologiques qui ont enregistré la fréquence la plus haute des années très pluvieuses et extrêmement pluvieuses ont été Târgu Jiu, Târgu Logrești et Padeș. Les mêmes stations ont illustré aussi la situation opposée, ayant les plus hautes fréquences des années extrêmement secs (40 – 50 %). Les autres stations ont été plus équilibrées, bénéficiant aussi d'un grand nombre des années avec un régime normal. Contrairement aux attentes, Bechet et Craiova, des stations météorologiques situées dans la région de plaine, n'ont pas enregistré les pourcentages les plus élevés des années sèches, étant caractérisées plutôt par un régime normal, un peu sec et un peu pluvieux. Les autres catégories, plus extrêmes, occupent moins de 25% des cas. Les stations météorologiques situées dans la région de montagne, Parâng, Petroșani et Obârșia Lotrului, présentent des fréquences des années à différents régimes qui décroissent de la catégorie normale (d'environ 40%) vers les catégories pluvieuses et sèches (~10%), sans atteindre des situations extrêmes (les années extrêmement pluvieuses et sèches y manquent).



### 3.5.3.4. L'indice standardisé des précipitations

L'indice des standardisé des précipitations (ISP) a été conçu pour répondre aux enjeux liés à la persistance de la sécheresse, mais il est tout aussi efficace pour révéler les périodes ou cycles humides et secs [OMM, 2012]. Tout en étant souple à calculer à partir d'un seul paramètre (les relevés mensuels de précipitations sont les seules valeurs dont il faut disposer), il permet de quantifier le déficit ou l'excédent de précipitations pour différentes échelles de temps, en détectant ainsi rapidement les situations de sécheresse ou les périodes excessivement humides [McKee *et al.*, 1993]. L'ISP peut être calculé pour des laps de temps de 3 à 48 mois, d'où l'avantage de l'utilisation de cette méthode qui ne demande de disposer que des précipitations mensuelles [McKee *et al.*, 1993]. Adapté à différentes échelles de temps, les valeurs ponctuelles de l'indice sous forme normalisée peuvent être spatialisées pour de diverses analyses à différentes échelles spatiales.

Le calcul de l'ISP est basé sur l'historique de précipitations de plusieurs années auxquelles une distribution de probabilité est ajustée. Ensuite, la série est transformée en une distribution normale pour que l'ISP moyen soit égal à zéro [Edwards et McKee, 1997]. Les valeurs positives de l'ISP indiquent des précipitations supérieures à la médiane et les valeurs négatives, des précipitations inférieures à la médiane. Étant donné la normalisation de l'indice, il est possible de représenter les périodes humides et sèches [OMM, 2012]. A partir des cumules de précipitations mensuelles des 8 stations étudiées, nous avons déterminé l'ISP, en calculant les valeurs des déviations moyennes annuelles (%) pour la période analysée (1961-2013). La formule de calcul de l'Indice Standardisé de Précipitations est [Descrois *et al.*, 2016]:

$$ISP = (P_i - P_{moy})/\sigma$$

où  $P_i$  = précipitation de l'année "i";  $P_{moy}$  = précipitation moyenne de la série;  $\sigma$  = déviation standard de la série; l'index est adimensionnel).

Afin de caractériser l'intensité des épisodes de sécheresse et de pluie en fonction de la valeur de l'ISP, McKnee (1993) a défini des critères pour une échelle de temps quelle qu'elle soit (Figure III.24).

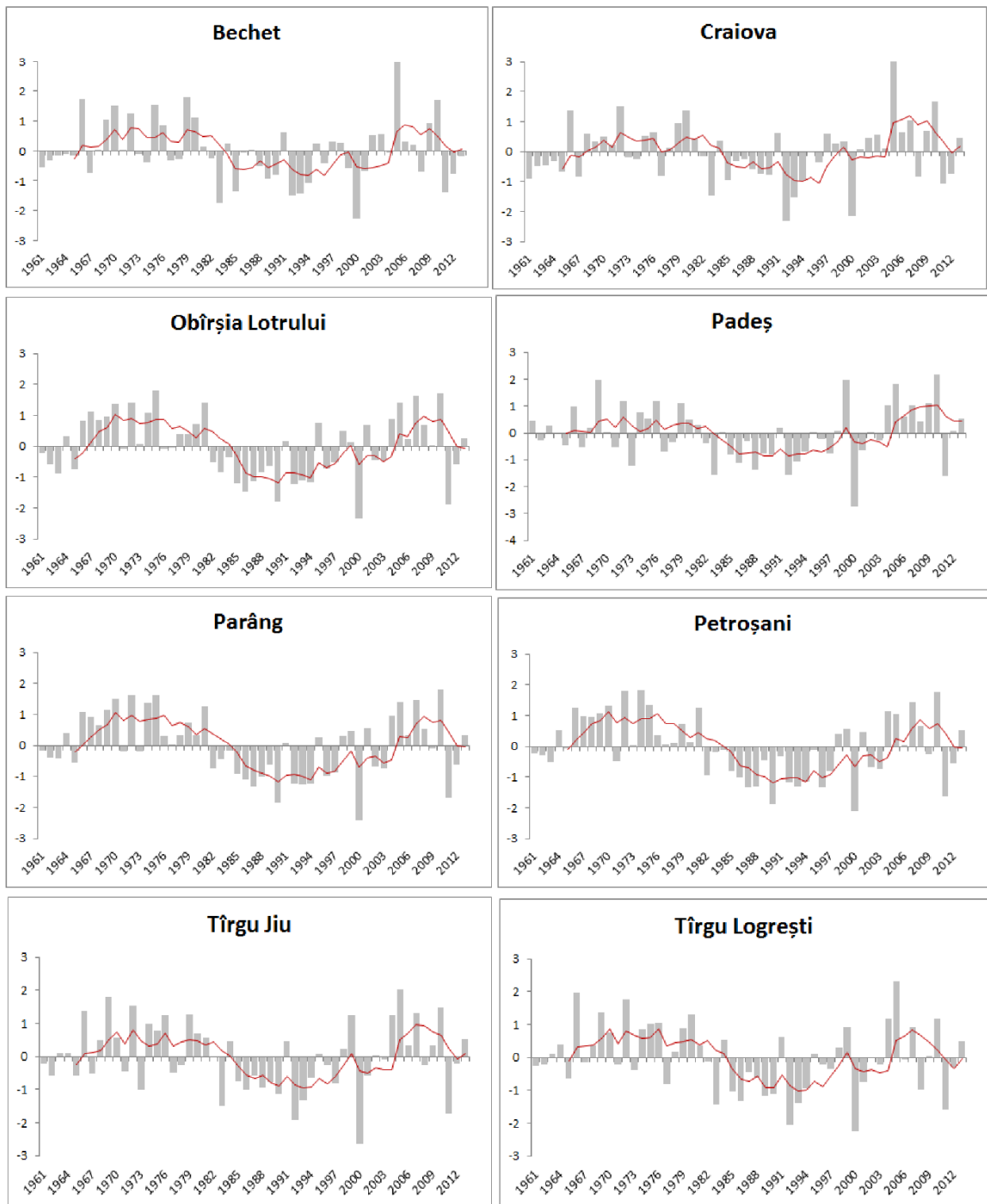
2,0 et plus	Extrêmement humide	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Indice ISP</th> <th>Catégorie</th> <th>Nombre de fois sur 100 ans</th> <th>Fréquence</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>de 0 à 0,99</td> <td>Légère humidité</td> <td>33</td> <td>1 fois tous les 3 ans</td> </tr> <tr> <td>de 1,00 à 1,49</td> <td>Période humide d'intensité modérée</td> <td>10</td> <td>1 fois tous les 10 ans</td> </tr> <tr> <td>de 1,5 à 1,99</td> <td>Période humide importante</td> <td>5</td> <td>1 fois tous les 20 ans</td> </tr> <tr> <td>&gt; 2,0</td> <td>Humidité extrême</td> <td>2</td> <td>1 fois tous les 50 ans</td> </tr> </tbody> </table>	Indice ISP	Catégorie	Nombre de fois sur 100 ans	Fréquence	de 0 à 0,99	Légère humidité	33	1 fois tous les 3 ans	de 1,00 à 1,49	Période humide d'intensité modérée	10	1 fois tous les 10 ans	de 1,5 à 1,99	Période humide importante	5	1 fois tous les 20 ans	> 2,0	Humidité extrême	2	1 fois tous les 50 ans
Indice ISP	Catégorie		Nombre de fois sur 100 ans	Fréquence																		
de 0 à 0,99	Légère humidité		33	1 fois tous les 3 ans																		
de 1,00 à 1,49	Période humide d'intensité modérée		10	1 fois tous les 10 ans																		
de 1,5 à 1,99	Période humide importante		5	1 fois tous les 20 ans																		
> 2,0	Humidité extrême		2	1 fois tous les 50 ans																		
de 1,5 à 1,99	Très humide																					
de 1,0 à 1,49	Modérément humide																					
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale																					
de -1,0 à -1,49	Modérément sec																					
de -1,5 à -1,99	Très sec																					
-2 et moins	Extrêmement sec																					

Durée, intensité, magnitude →

Figure III.24. Système de classification de l'IPS [adopté selon McKnee, 1993 et Vladut, 2007]

Ces critères sont couramment utilisés en Roumanie aussi, sur les cumuls des précipitations mensuelles.

Pour notre région d'étude, nous avons considéré les valeurs de l'ISP, afin d'analyser la relation entre les périodes avec des pluies importantes et ceux avec des crues. Les valeurs de l'ISP supérieures à 1,5 indiquent les périodes (mois, années) avec humidité importante, voir extrême (si l'ISP>2), en permettant d'identifier les périodes avec d'événements pluvieux qui ont généré de grandes crues (Figure III.25).



**Figure III.25.** Evolution de l'indice standardisé des précipitations (ISP) pour la période 1961 – 2013. Colonnes gris – l'Indice Standardisé des Précipitations et ligne courbe rouge - sa moyenne mobile sur 5 ans

L'analyse des graphiques de la **Figure III.25** montre une alternance de périodes avec des années humides (avant 1980 et après 2000) et sèches (les décennies '80 – '90). Parmi les années extrêmement humides se détachent 1969, 1972, 2005 et 2010, où des crues majeures ont eu lieu dans le bassin de la rivière Jiu. On peut constater que vers la fin de la période d'analyse, les valeurs positives de l'ISP sont plus grandes que celles négatives (des valeurs supérieures à «+2 », par rapport aux valeurs négatives qui ne sont pas inférieures à -2).

Nous pouvons constater également que certaines stations sont caractérisées par des écarts plus longs de la moyenne, que ce soit dans un sens (positif – saisons pluvieuses consécutives), ou l'autre (e.g.

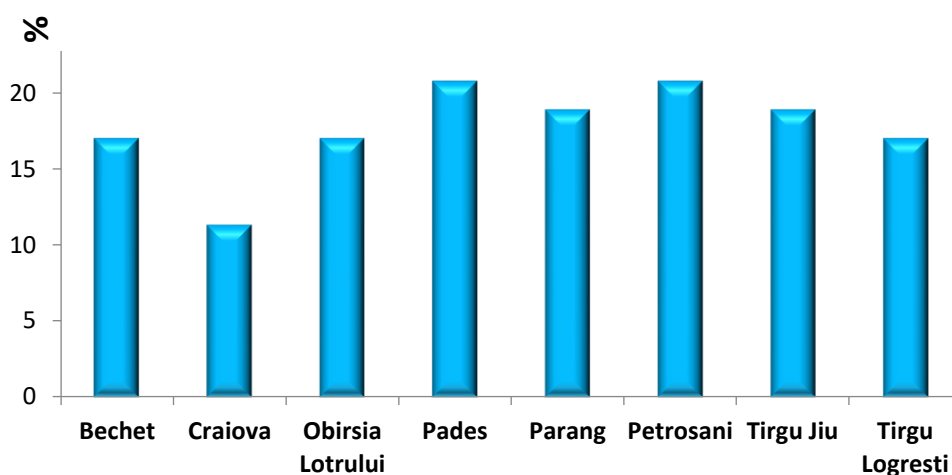
s.m. Târgu Logrești), tandis que pour d'autres stations (e.g. s.m. Padeș), l'alternance entre les saisons contrastantes écartées de la moyenne est plus rapide, en ayant donc des saisons sèches et pluvieuses qui se succèdent plus fréquemment.

Nous avons également déterminé les valeurs de l'ISP à l'échelle des saisons. De l'analyse du **Tableau III.5**, on peut remarquer la différence entre les différentes saisons en ce qui concerne la répartition des mois secs et pluvieux. On observe une alternance des années sèches et pluvieuses pendant l'été, qui se caractérise par les deux types d'extrêmes climatiques, tandis que pendant l'hiver et le printemps, les périodes des années sèches et pluvieuses durent plus longtemps. On voit aussi plus clairement que le printemps bénéficie des plus longues périodes d'années pluvieuses, par rapport aux autres saisons.

**Tableau III.5.** L'Indice Standardisé des Précipitations (ISP) à l'échelle des saisons pour les stations analysées (période d'analyse 1961 – 2013)

Bechet	Craiova	Obârșia Lotrului	Padeș	Parâng	Petroșani	Tîrgu Jiu	Tîrgu Logrești
HIVER							
[Bar chart showing ISP for Winter across stations]							
PRINTEMPS							
[Bar chart showing ISP for Spring across stations]							
ETE							
[Bar chart showing ISP for Summer across stations]							
AUTOMNE							
[Bar chart showing ISP for Autumn across stations]							

En considérant la fréquence des mois avec excédent pluviométrique durant la période 1961 - 2013 (conformément à l'ISP), la **Figure III.26** montre la variabilité d'une station à l'autre. Aux stations situées à la montagne (Obârșia Lotrului et Petroșani notamment), ainsi qu'à Padeș, cette fréquence est la plus élevée, tandis qu'à la station de Craiova est la plus réduite.



**Figure III.26.** Fréquence des mois avec excédent pluviométrique aux stations météorologiques analysées (1961 – 2013), conformément à l'ISP

### 3.5.3.5. L'indice de pluie extrême

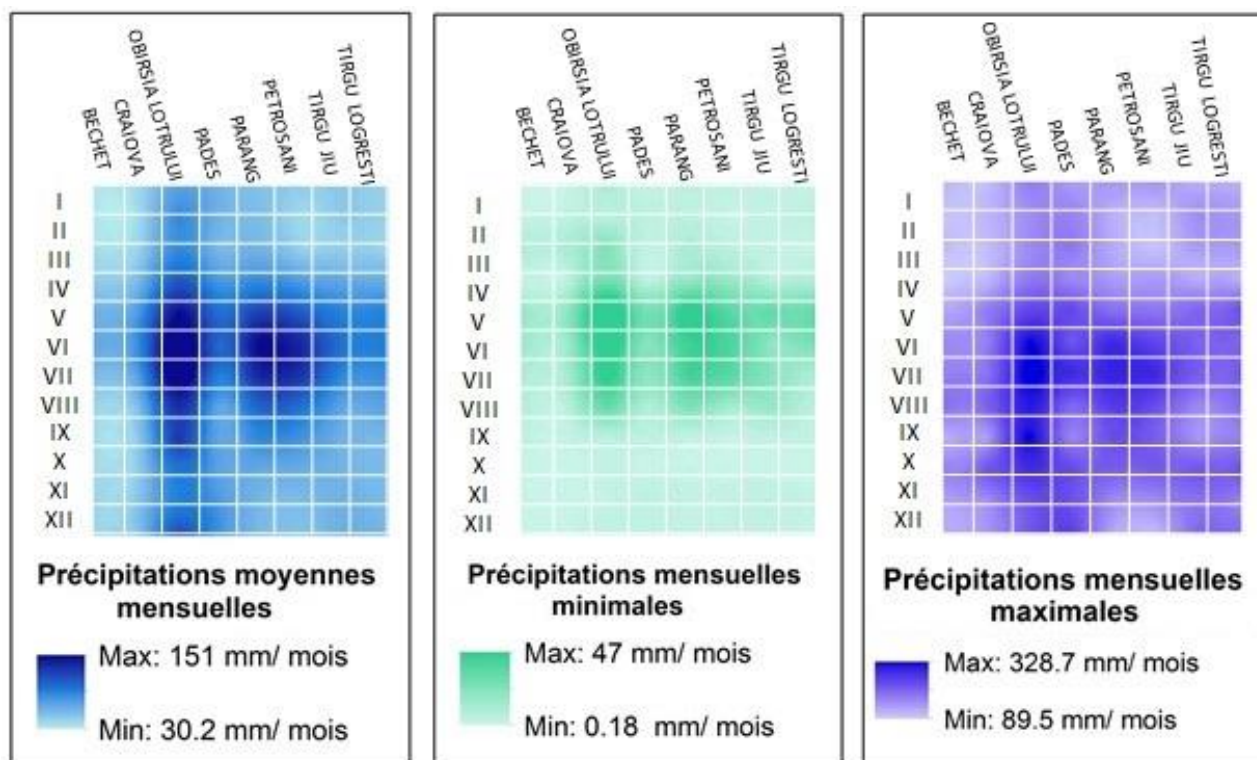
Un autre indice que nous avons utilisé pour analyser la pluviométrie dans le bassin de la rivière Jiu est l'**Indice de pluie extrême (IPE)**, défini comme la somme des différences absolues entre les précipitations moyennes mensuelles multiannuelles et les précipitations maximales mensuelles, et minimales mensuelles. C'est une approche originale qui permet de mieux mettre en évidence les stations à

haute fréquence des périodes de sécheresse et des périodes de précipitations abondantes dans la région étudiée. L'IPE a été calculé avec la formule :

$$IPE = (P_{\text{moy.mois}} - P_{\text{min.mois}}) + ABS(P_{\text{moy.mois}} - P_{\text{max.mois}})$$

Où :  $P_{\text{moy.mois}}$  = les précipitations moyennes mensuelles multiannuelles ;  $P_{\text{max.mois}}$  = les précipitations maximales mensuelles ;  $P_{\text{min.mois}}$  = les précipitations minimales mensuelles

Le calcul de cet indice au niveau mensuel est basé sur les précipitations moyennes, minimales et maximales mensuelles multiannuelles aux stations étudiées (**Figure III.27**). Les teintes de couleur ont été obtenues en interpolant les valeurs des précipitations de chaque mois pour les 8 stations météorologiques analysées.



**Figure III.27.** Répartition par la méthode du krigeage des précipitations mensuelles moyennes, minimales et maximales aux stations étudiées pour la période 1961 - 2013

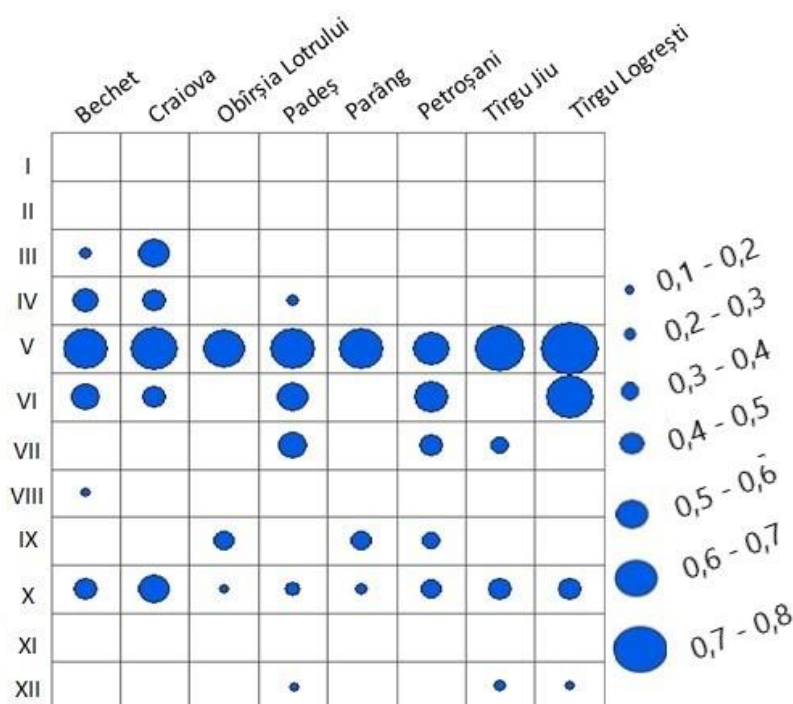
Selon la valeur de l'IPE, que nous avons standardisé<sup>5</sup>, nous avons représenté les résultats finaux de la **Figure III.28**, en classifiant les valeurs supérieures au seuil de "0,1" (que nous l'avons considéré limite inférieure pour le type des mois très contrastant du point de vue pluviométrique):

- valeurs entre 0,1 et 0,4 – qualificatif reçu : „moyennement extrême" ;
- valeurs entre 0,4 et 0,7 - qualificatif reçu : „assez extrême" ;
- valeurs supérieures à 0,7 - qualificatif reçu : „très extrême”.

La **Figure III.28** montre que le mois de mai et de juin, ont le caractère le plus extrême en termes de pluviométrie, de sorte qu'ils peuvent être ainsi caractérisés dans certaines années soit comme mois des fortes pluies, soit comme mois sèches. Au contraire, octobre est caractérisé par des périodes de pluie moins spectaculaires comme intensité, donc modérées dans toutes les stations météorologiques. Pendant la période

<sup>5</sup> En utilisant l'approche classique du calcul de la moyenne et de l'écart type pour chaque série. Ensuite, pour chaque valeur observée de la série, la moyenne a été soustraite et la valeur résultante a été divisée par l'écart type. Les valeurs de l'IPE standardisées se situent ainsi entre -1 et 1.

chaude (mai – octobre), nous avons retrouvé presque toutes les trois classes d'extrême pluviosité. La fréquence élevée de la pluviosité extrême à la station de Târgu Logrești, identifiée initialement dans la classification selon le critère Hellmann et selon l'ISP, se remarque avec l'IPE aussi.

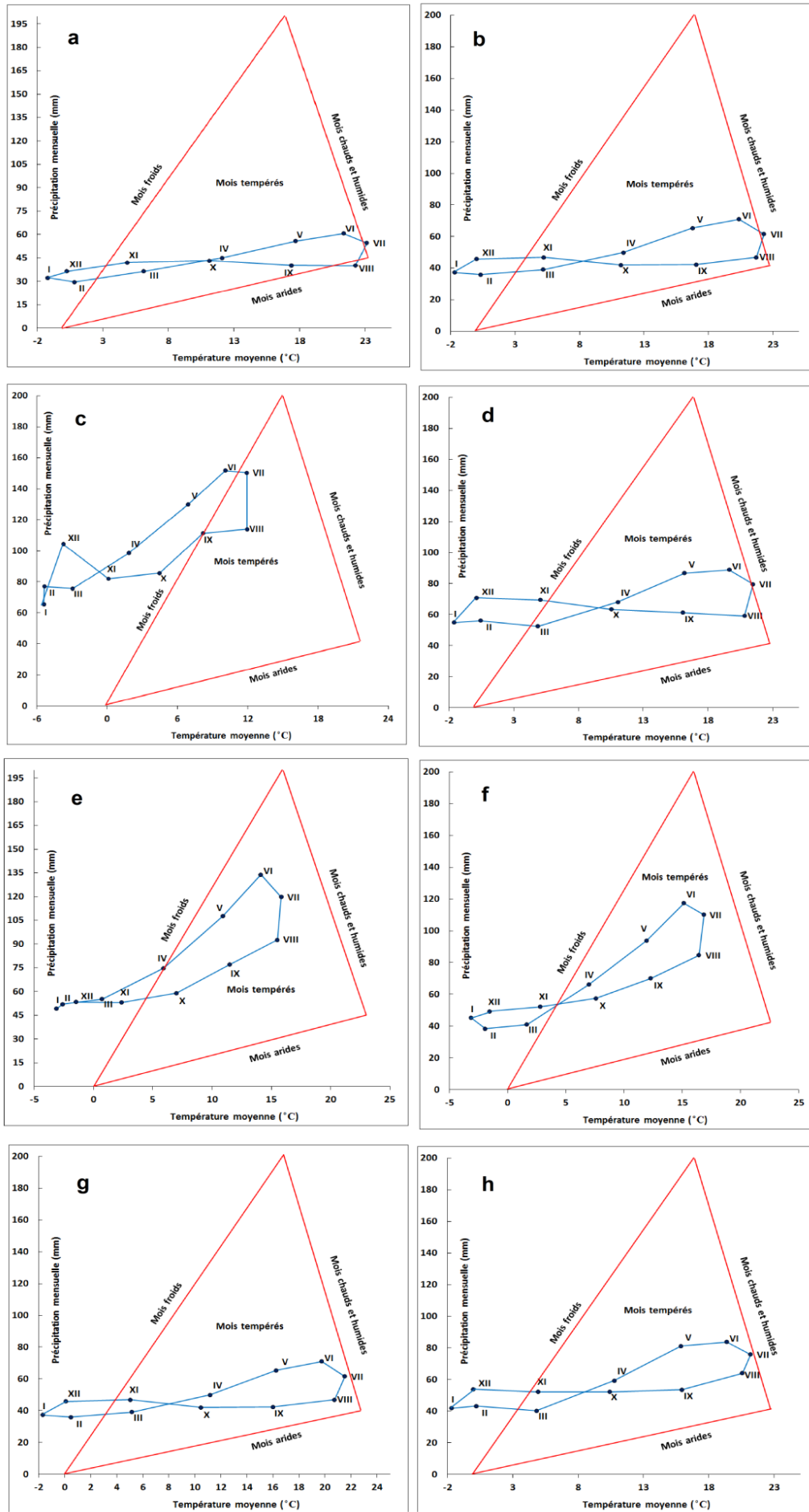


**Figure III.28.** La classification des mois en fonction des valeurs de l'indice de pluie extrême (IPE) aux stations analysées (période 1961 – 2013)

### 3.5.4. Diagramme climatique de Péguy

Les particularités climatiques de la région d'étude ont été mises en évidence par le diagramme climatique de Péguy. Ceci groupe les mois de l'année en quatre types selon la distribution des précipitations et températures : mois froids, mois tempérés, mois chauds et humides et mois arides [Péguy, 1961]. Les diagrammes pour les stations analysées sont illustrés dans la **Figure III.29**, montrant les mois encadrés dans chacun des 4 types de périodes climatiques. L'analyse du diagramme Péguy aux 8 stations météorologiques nous conduit aux conclusions suivantes :

- Les mois aux s.m. analysées sont encadrés dans deux types de périodes : tempérée et froide ;
- Le mois d'août s'encadre à l'extérieur du triangle correspondant aux mois tempérés à la station météorologique de Craiova et il est caractérisé, selon le diagramme, par un climat aride. Il n'y a pas des mois arides aux autres stations météorologiques.
- Les mois d'hiver s'encadrent tous dans la période froide, avec une prolongation en automne et début printemps pour les stations Padeș, Petroșani et Parâng. A la station de Obârșia Lotrului, ces mois froids continuent en printemps et en été aussi, jusqu'en juin. En effet, les stations de Parâng et Obârșia Lotrului ont moins d'un quart de mois tempérés, l'altitude à laquelle elles sont situées (*au-dessus de 1000 m*) étant propre au climat froid et pluvial.
- Les stations météorologiques Bechet, Craiova, Târgu Jiu et Târgu Logrești, bien que situées dans des régions différentes, ont des climogrammes assez similaires, avec la plupart des mois (7-8 selon le cas) dans l'espace du triangle tempéré.



**Figure III.29.** Diagrammes Peguy aux 8 stations météorologiques analysées (1961 – 2013) : **a.** Craiova; **b.** Bechet; **c.** Obârșia Lotrului; **d.** Padeș; **e.** Parâng; **f.** Petroșani; **g.** Târgu Jiu; **h.** Târgu Logrești

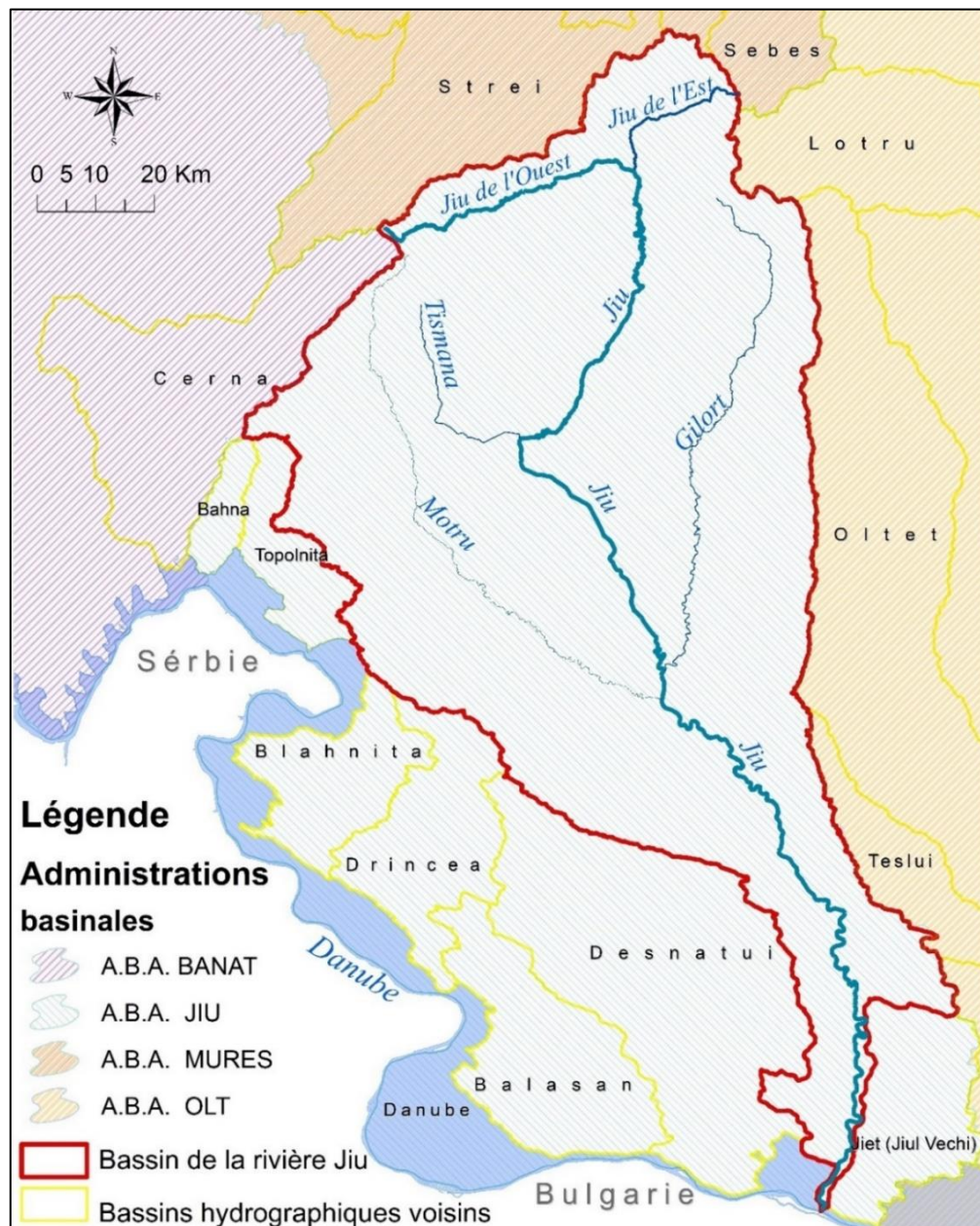


- Aucune station ne présente des mois qui pourraient être clairement encadrées dans le climat chaud et humide. Seulement le point correspondant au mois de juillet des stations de Craiova et Bechet se situe sur le côté du triangle à la limite entre le type tempéré et celui chaud et humide.
- Les autres sept mois (*mars – mai et août – décembre*) sont tempérés, caractérisés par des valeurs normales de la température et des précipitations pour cette zone.

### 3.6. Un bassin avec des caractéristiques hydrographiques complexes

#### 3.6.1. Les sous-bassins et leur réseau hydrographique

La rivière Jiu (code cadastral VII.1) est un affluent du premier ordre du fleuve Danube, leur confluence étant à 692 km avant que le fleuve se jette dans la Mer Noire. La rivière Jiu a une longueur de 339 km et une superficie de bassin hydrographique de 10080 km<sup>2</sup> (**Figure III.30**). Ce territoire, ainsi que les bassins versants voisins (Desnățui, Drincea, Cerna) qui se jettent directement dans le fleuve Danube est géré par l'Administration Basinale d'Eau (ABA Jiu), avec le siège à Craiova.



**Figure III.30.** Le bassin hydrographique de la rivière Jiu et les bassins voisins

Les bassins hydrographiques voisins au bassin de la rivière Jiu sont: au N-O – les bassins de la rivière Topolnița, Bahna et Cerna ; au N – les bassins des rivières Strei et Sebeș; au N-E – le bassin de la rivière Lotru; à l’E, le bassin de la rivière Olteț; au S-E – le bassin de Teslui ; au S – le bassin du petit ancien bras de la rivière Jiu, la Jieț, qui forme, depuis un siècle, un bassin hydrographique séparé, tributaire au Danube, mais qui est alimenté par le système de la Jiu; à l’ouest les bassins des rivières Desnățui et Drincea. Les bassins voisins sont gérés par des différentes administrations bassinales (**Figure III.30**).

Le réseau hydrographique du bassin de la rivière Jiu englobe 232 cours d’eau cadastrés d’une longueur cumulée de 3876 km. Les rivières cadastrées confèrent une densité du réseau hydrographique de 0,39 km/km<sup>2</sup>, supérieure à la moyenne du pays (0,33 km/km<sup>2</sup>). La rivière Jiu résulte de la jonction de deux cours d’eau à Livezeni, dans la dépression de Petroșani : la Jiu de l’Ouest (ou la Jiu Roumaine), considérée comme la rivière principale, et la Jiu de l’Est (ou la Jiu Transylvanienne). La Jiu de l’Ouest (S = 496 km<sup>2</sup>, L = 54 km) a ses sources dans le Massif Retezatul Mic à une altitude de 1720 m. La Jiu de l’Est (S = 468 km<sup>2</sup>, L = 29 km) se forme dans la partie orientale de la dépression de Petroșani, sur le versant sud du Massif Șureanu, à une altitude d’environ 1500 m [PMRI, 2016]. Le long de son cours, la rivière Jiu reçoit 31 affluents du côté droite et 21 affluents du côté gauche, parmi lesquels nous mentionnons: Valea de Pești (S = 32 km<sup>2</sup>; L = 11 km), Taia (S = 88 km<sup>2</sup>, L = 21 km), Izvorul (S = 39 km<sup>2</sup>, L = 11 km), Sadu (S = 93 km<sup>2</sup>, L = 23 km), Șușița (S = 237,8 km<sup>2</sup>, L = 37 km), Tismana (S = 894 km<sup>2</sup>, L = 42 km), Cioiana (S = 175,2 km<sup>2</sup>, L = 39 km), Gilort (S = 1358 km<sup>2</sup>, L = 116 km), Motru (S = 1895 km<sup>2</sup>, L = 134 km), Amaradia Pietroasă (S = 234 km<sup>2</sup>, L = 37 km), Jilț (S = 377 km<sup>2</sup>, L = 49 km), Argetoaia (S = 249 km<sup>2</sup>; L = 50 km), Amaradia (S = 879 km<sup>2</sup>, L = 106 km), Raznic (S = 498 km<sup>2</sup>, L = 58 km)<sup>6</sup>.

Comme tout bassin versant complexe, s’étalant sur plusieurs unités de relief, ceci peut être divisé en trois grands secteurs : supérieur (montagneux, altitudes élevées et pentes fortes), moyen (qui correspond aux collines sous-carpatiques et de piémont) et inférieur (situé dans la région de plaine). Compte tenu de l’extension sur plusieurs domaines morphologiques des principaux affluents de la rivière Jiu (certains d’entre eux ont leurs cours supérieurs dans les Carpates, mais ils rejoignent la rivière Jiu plus en aval dans le secteur du piémont), le secteur montagneux du bassin de la rivière Jiu (délimité selon le critère géomorphologique) est plus étendu par rapport au bassin hydrographique (délimité par la ligne de partage des eaux dans la région montagneuse). Ainsi, des 2535 km<sup>2</sup> qui correspondent au domaine carpatique (secteur montagneux), seulement 1280 km<sup>2</sup> (50,5%) peuvent être considérés du point de vue hydrologique comme appartenant au secteur supérieur du bassin de la rivière Jiu. Plus précisément, le secteur supérieur du bassin de la rivière Jiu, est en fait, le bassin amont de la station hydrométrique Sadu, située à la sortie de la Jiu du secteur des gorges.

Le reste de 1255 km<sup>2</sup> (49,5%) appartient du point de vue géomorphologique au secteur supérieur (montagneux), par les têtes des sous-bassins affluents, mais hydrologiquement, la contribution de ces affluents à l’écoulement de la rivière Jiu se retrouve plus en aval, dans le secteur de piémont (**Tableau III.6**). Il y a 11 sous-bassins hydrographiques avec des surfaces supérieures à 100 km<sup>2</sup>, à côté desquels on peut mentionner le bassin de Jiu de l’Ouest que la rivière Jiu forme avant sa confluence avec la Jiu de l’Est.

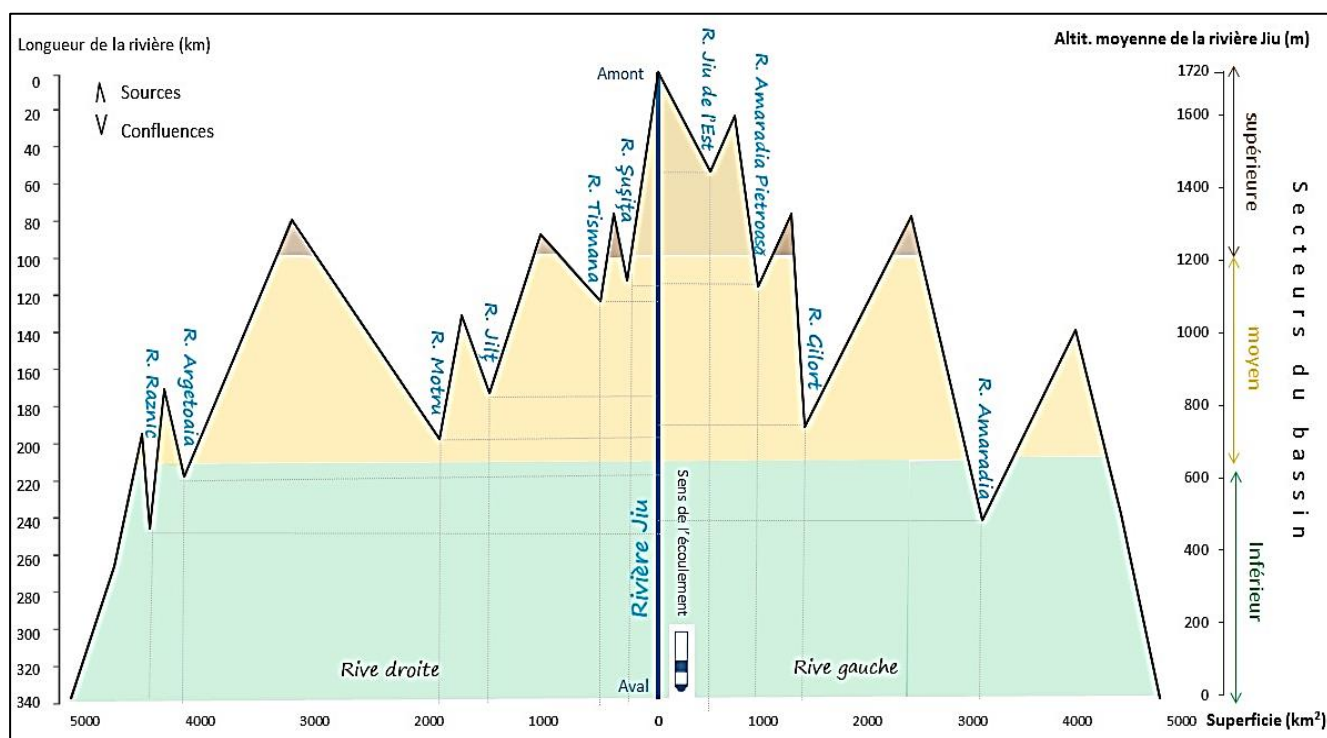
---

<sup>6</sup> S = la superficie du bassin versant, L = la longueur de la rivière. Source des données : Le Cadastre des Eaux Roumaines

**Tableau III.6.** La répartition des secteurs du bassin hydrographique de la rivière Jiu

Secteur	% de la superficie totale du b.v. Jiu	Sous-bassins repartis sur deux unités géomorphologiques	Partie du sous-b.v. en secteur montagne (km <sup>2</sup> )	% du secteur carpatique du b.v. Jiu
Inférieur	7.9%			
Moyen	79.42% → D'où:	Suşiţa	130.3	5.1%
		Runcu	132	5.2%
		Bistriţa	191.4	7.6%
		Motru	330.7	13.0%
		Tismana	107.3	4.2%
		Gilort	321.6	12.7%
		Amaradia Pietroasă	11.9	0.5%
		Autres petits affluents de la Jiu dans le secteur supérieur	29.8	1.2%
Supérieur	12.5%			

Les principaux sous-bassins appartiennent aux rivières Motru, Gilort, Amaradia, Tismana, Bistriţa et Jił. Le plus sous-bassin est celui de la rivière Motru (1895 km<sup>2</sup>), suivi du bassin de la rivière Gilort (1358 km<sup>2</sup>) et de l'Amaradia (879 km<sup>2</sup>). Le plus petit sous-bassin important est celui de Cioiana (175 km<sup>2</sup>). Les autres sous-bassins ont des superficies inférieures à 100 km<sup>2</sup>, le plus important étant le bassin de la rivière Sadu (93 km<sup>2</sup>), qui se jette dans la rivière Jiu à sa sortie du secteur des gorges et de la chaîne de montagnes. La superficie du bassin de la rivière Jiu augmente progressivement de l'amont vers l'aval, au fur et à mesure que des nouveaux sous-bassins s'ajoutent (*Figure III.31*).



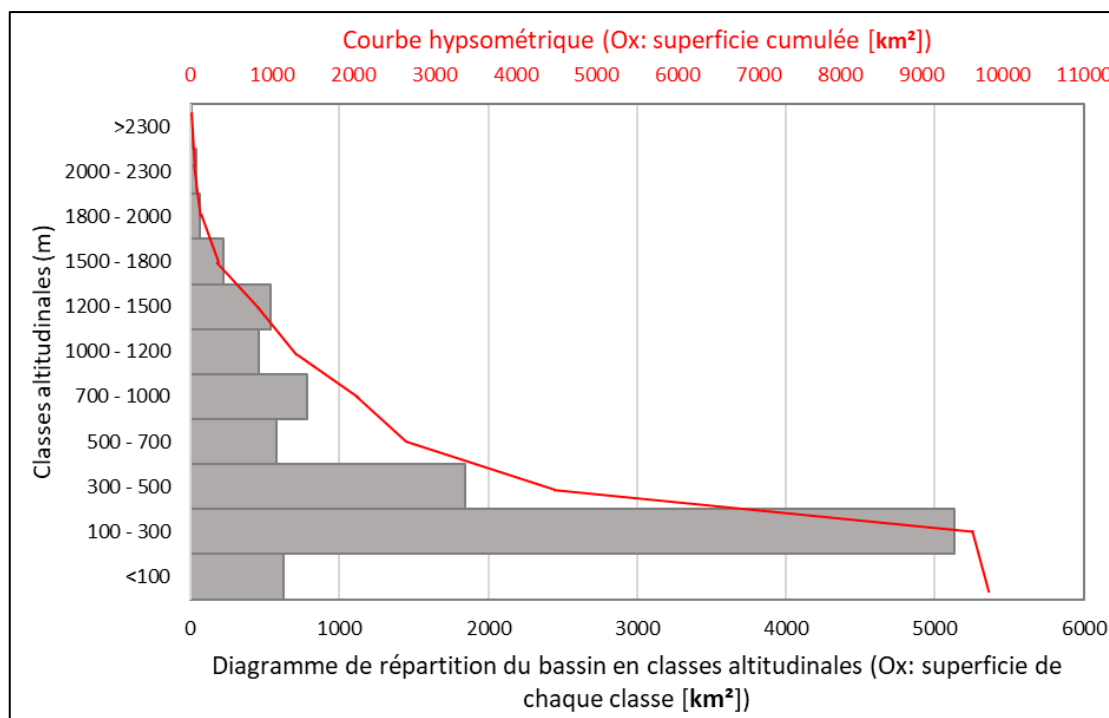
**Figure III.31.** La représentation schématique du développement du bassin de la rivière Jiu. La ligne noire continue est le graphique d'augmentation de la superficie du bassin versant après chaque confluence avec les affluents importants, tandis que la ligne marron interrompue montre l'évolution de l'altitude

Cette augmentation de la superficie de l'amont en aval est représentée dans la *Figure 11.32* sur l'épure séparément pour la partie droite et gauche du bassin de la rivière Jiu. La signification de cette figure est multiple. D'une part, elle montre la succession des sous-bassins qui contribuent à l'augmentation de la superficie du bassin de la rivière Jiu, d'autre part, elle illustre les trois secteurs (supérieur, moyen et

inférieur) du bassin, ainsi que l'évolution de la courbe hypsographique et l'altitude du bassin amont correspondant à chaque confluence.

Le bassin hydrographique de la rivière Jiu a une faible asymétrie de droite (le coefficient d'asymétrie étant de -0,19), ce qui signifie que sur la superficie de la partie droite du bassin est avec 19% plus grande, par rapport à la partie gauche.

Le graphique de la distribution du bassin de la rivière Jiu par classes d'altitude (**Figure III.32**), montre que la moitié de la surface est située entre 100 et 300 m. Les surfaces comprises entre 300 et 500 m occupent 18% du bassin versant de la rivière Jiu, tandis que les autres classes altitudinales détiennent moins de 8% chacune, en diminuant vers les plus hautes altitudes jusqu'à moins de 1%.



**Figure III.32.** La distribution du bassin hydrographique de la rivière Jiu par classes altitudinales et la courbe hypsographique

Le profil longitudinal a une pente abrupte, dans le secteur montagneux, qui diminue progressivement à partir de l'entrée dans le secteur sous-carpatique. La rivière Jiu a une pente moyenne de 5‰ et un coefficient de sinuosité de 1,85. Son profil longitudinal (**Figure III.7** de §3.4) montre les changements de pente avec la diminution de l'altitude au fur et à mesure que la rivière traverse les différentes unités de relief qui se succèdent de montagnes à la plaine. Sur le profil longitudinal, les confluences avec les rivières principales sont marquées et dans le **Tableau III.7** les caractéristiques morphométriques de la rivière Jiu en amont des confluences principales sont présentées. Les caractéristiques de la rivière Jiu qu'on présente ne proviennent pas entièrement de l'Atlas du Cadastre des Eaux Roumaines, ce qui signifie qu'ils peuvent varier légèrement par rapport aux valeurs indiquées dans un tel document. Elles ont été déterminées dans la plupart, à travers les analyses géospatiales susmentionnées, en milieu SIG, à partir du modèle numérique altitudinal, d'où des petites différences d'ordre de l'unité ou de la sous-unité (m, ‰, km, km<sup>2</sup>) entre nos valeurs et celles que l'on peut trouver dans l'Atlas du Cadastre des Eaux Roumaines.



**Tableau III.7.** Les caractéristiques morphométriques des secteurs de la rivière Jiu en amont des confluences avec les affluents principaux

No.	Secteur de la rivière Jiu	D (km)	H (m) à la confluence	I <sub>moy</sub> (‰)	S (km <sup>2</sup> )	H <sub>moy.bassin</sub> (km)
1	am. confl. Jiu de l'Est	54	555	21.6	500	1134
2	am. confl. Sadu	88	308	16.0	1267	1066
3	am. confl. Șușița	113	180	13.6	1486	872
4	am. confl. Amaradia Pietroasă	116	173	13.3	1495	854
5	am. confl. Tismana	124	162	12.6	2018	827
6	am. confl. Cioiana	143	135	11.1	3081.6	734
7	am. confl. Jilț	174	117	9.2	3427	633
8	am. confl. Gilort	192	108	8.4	3873	587
9	am. confl. Motru	199	106	8.1	5310	563
10	am. confl. Argetoaia	219	93	7.4	7363	505
11	am. confl. Amaradia	243	78	6.8	7886	488
12	am. confl. Raznic	247	83	6.6	8692	466
13	Rivière entière amont confl. Danube	339	28	5.0	10080	417

D = la distance/ longueur du secteur considéré ; H = l'altitude de la rivière Jiu à la confluence ; I<sub>moy</sub> = la pente moyenne ; S = la superficie du bassin de la rivière Jiu en amont des confluences mentionnées ; H<sub>moy.bassin</sub> = l'altitude du bassin en amont des confluences (source : l'Atlas du Cadastre des Eaux Roumaines et analyses propres en SIG)

Le cours supérieur de la rivière Jiu a une pente en moyenne de 58 ‰, en amont de Câmpu lui Neag. Dans le bassin supérieur de la Jiu, amont de la confluence avec la rivière Sadu, les pentes des rivières sont comprises entre 30 et 18 ‰ pour la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est et entre 120‰ et 25‰ pour les affluents, ce qui favorise l'écoulement rapide de l'eau. Dans la Dépression de Petroșani, les pentes des rivières diminuent (environ 7 ‰) et la vallée s'élargit progressivement, hébergeant les sites d'extraction du charbon. En aval de Petroșani, dans le secteur des gorges (Surduc-Lainici), la Jiu a une chute d'environ 250 m sur 33 km et une pente moyenne d'environ 18 ‰. A la sortie des gorges (aval de la confluence avec Sadu, son dernier affluent entièrement carpatique), la rivière Jiu entre dans son secteur moyen, traversant les Subcarpathes Gétiques et le Piémont Gétique. Les pentes y baissent progressivement jusqu'à moins de 10‰ et le lit majeur se développe, tandis que le lit mineur devient sinueux et divagant.

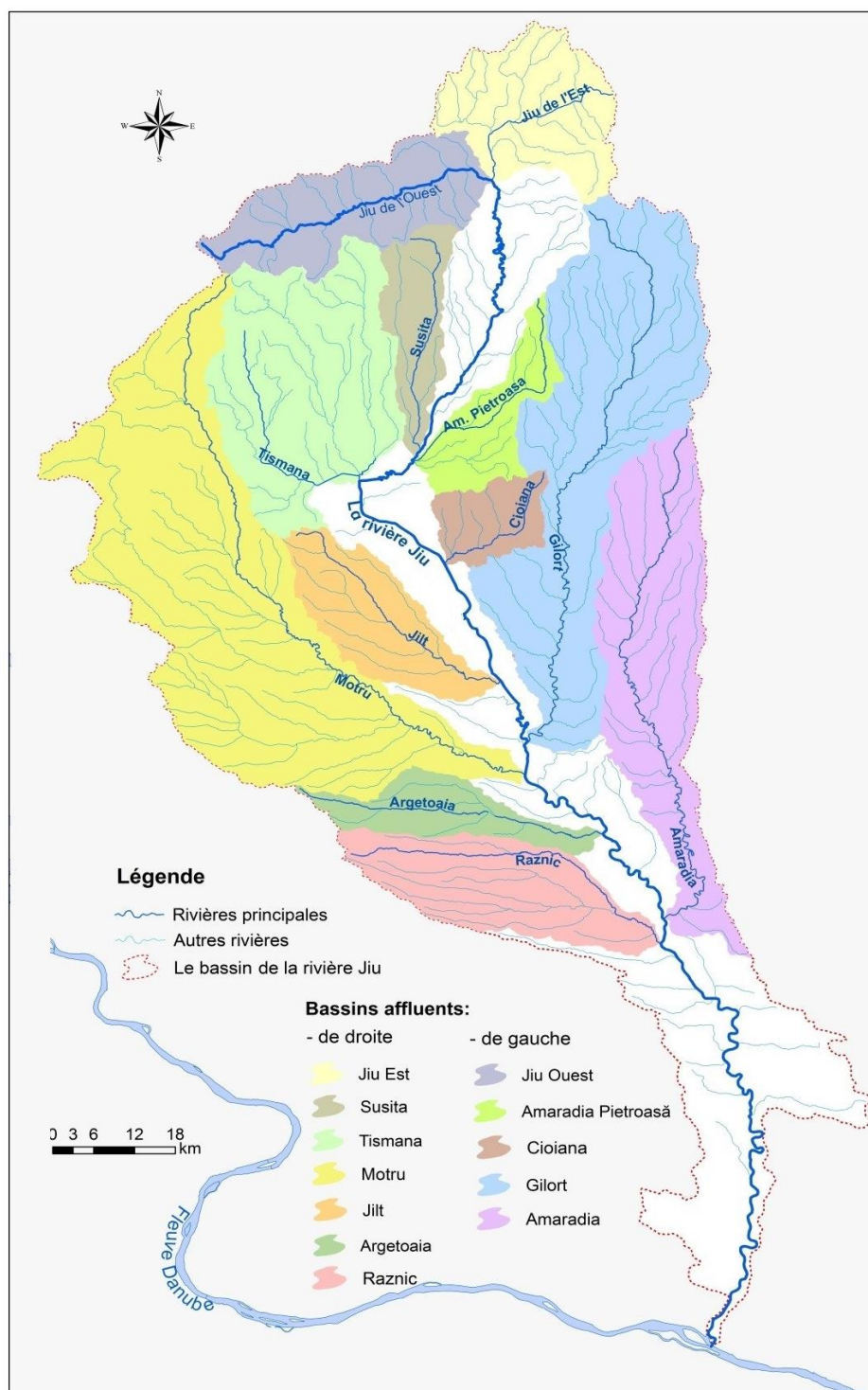
Dans le Piémont Gétique, la rivière Jiu reçoit au droit de la confluence avec son plus important affluent, la rivière Motru (au sud-ouest de la ville de Filiași, à une altitude d'environ 100 m, à 155 de l'embouchure de la rivière Jiu). En aval, à partir de la ville de Craiova, la vallée de la Jiu a formé des méandres et des anciens bras qui sont actuellement des zones humides de la plaine d'inondation. Le dernier affluent permanent de la Jiu est la rivière Craiovița sur la côté gauche.

Dans le secteur de plaine, les autres affluents sont quelques petites vallées à caractère torrentiel. Il convient de mentionner dans ce secteur l'existence de sources abondantes sur le versant est (comme celles de Gioroc, Murta, Dobrești), qui, par leur constance de leur débit, offrent des possibilités locales d'utilisation de l'eau pour la population, l'agriculture et même pour la récréation.

Au total, dans le bassin de la rivière Jiu, ont été recensés 275 rivières d'une superficie de plus de 10 km<sup>2</sup>, 36 plans d'eau, parmi lesquels 14 sont des lacs naturels de superficie supérieure à 0,5 km<sup>2</sup> et 12 réservoirs à usages multiples d'une superficie supérieure à 50 ha (*Annexe 5*). Parmi les réservoirs les plus importants on mentionne : Valea de Pești (Vt = 5,3 mil. m<sup>3</sup>), Valea Mare (29,7 mil. m<sup>3</sup>), Vădeni-Târgu Jiu (Vt = 2,6 mil. m<sup>3</sup>), Turceni (Vt = 9,9 mil. m<sup>3</sup>). Les eaux de surface liées aux rivières et aux lacs sont de

4059,1 mil. m<sup>3</sup> (128,7 m<sup>3</sup>/s) et les ressources en eau souterraine comptent un volume de 1,035 million m<sup>3</sup> (32,8 m<sup>3</sup>/s), dont 568 mil. m<sup>3</sup> eaux phréatiques et 467 mil. m<sup>3</sup> des nappes profondes [ANAR, 2016].

Les plus importants affluents de la rivière Jiu sont répartis comme suit : *a*) sur le côté droit, la rivière Jiu reçoit 31 affluents, parmi lesquels les rivières Tismana, Jilt, Motru et Raznic ; *b*) sur le côté gauche, la Jiu reçoit 21 affluents, dont les plus importants sont la Jiu de l'Est, Gilort et l'Amaradia. Les bassins versant des affluents occupent environ 77,5% de la surface du bassin de la rivière Jiu, les 22,5% restants étant constitués de surfaces inter-bassinales, englobant des bassins hydrographiques de moins de 100 km<sup>2</sup>, généralement sans drainage permanent (*Figure III.33*).



**Figure III.33.** Le bassin de la rivière Jiu et les sous-bassins de ses plus grands affluents

*La rivière Tismana* draine avec ses affluents la pente sud - sud-ouest du Massif Vâlcan, traverse la région des Sous-Carpates Gétiques et rejoint la rivière Jiu près du village Stejaru. Son bassin versant a



une superficie de 897 km<sup>2</sup>, une altitude moyenne de 581 m et une pente moyenne de 140 m/km. La rivière Tismana prend ses sources à une altitude de 1460 m et près de la station hydrométrique de Godinești, la vallée a une forme étroite creusée en calcaires, avec de pentes élevées qui dépassent 60%. Les secteurs de type canyon sont caractéristiques du cours supérieur de la rivière Tismana et de ses principaux affluents (les rivières Bistrița et Sohodol qui devient plus tard l'affluent Jaleș), où des sources karstiques apportent des volumes constants d'eaux souterraines. Le cours moyen traverse la dépression sous-carpatique de Tismana, où les pentes diminuent, la vallée devient large, avec des terrasses évidentes. Dans le secteur inférieur, le lit majeur atteint des largeurs appréciables. Un aspect qui va jouer un rôle essentiel dans le régime hydrologique est le fort caractère aménagé du bassin de la Tismana, par le système hydro-énergétique complexe Cerna – Motru – Tismana. Des travaux de dérivation des eaux d'un bassin à l'autre (des rivières Cerna et Motru vers la rivière Tismana) et le fonctionnement des barrages - réservoirs aménagés sur le cours de la rivière Tismana (Tismana I et II) et de son affluent Bistrița (Clocotiș et Vâja) sont à l'origine des altérations du débit survenu depuis les années 1980 (*Annexes 5 et 6*). On verra dans le chapitre §5 quel est l'impact de ces modifications sur les débits mensuels, annuels et multi-annuels.

*La rivière Jilț* est une rivière typique de plateau, drainant complètement la partie nord-ouest du Piémont Gétique, avec une superficie de 377 km<sup>2</sup> et une altitude moyenne de 231 m. Sa direction d'écoulement correspond à l'inclinaison générale des collines monoclinales (nord-ouest au sud-est). Le bassin de la rivière Jilț est très important pour les flux hydro-sédimentaires de la rivière Jiu par le fait d'être superposé avec une partie majoritaire sur le bassin carbonifère Motru – Rovinari dans son secteur supérieur et moyen. Les exploitations du lignite dans les zones d'origine de la rivière Jilț et ses affluents ont induit des modifications irréversibles dans le relief et les vallées des rivières (l'apparition des carrières de lignite et des tas de stérile), ainsi que des altérations dans la composition des sédiments fins qui arrivent finalement dans la rivière Jiu. On analysera dans le chapitre §4 de cette première partie et à partir du chapitre §8 la contribution hydro-sédimentaire de ce petit bassin versant au budget total des alluvions enrichies en particules charbonneuses dans le secteur aval de la rivière Jiu.

*La rivière Motru* est le plus important affluent de la rivière Jiu. Elle prend ses sources dans les montagnes Mehedinți, au-dessous du sommet Piatra Arsă, à environ 1330 m d'altitude et son bassin versant a une superficie de 1874 km<sup>2</sup>, une altitude moyenne de 401 m et une pente moyenne de 78 m/ km. Le cours supérieur est caractérisé par une vallée étroite, développée dans les calcaires Jurassique, où la rivière Motru forme des gorges près du village Cloșani. Dans le secteur supérieur, la Motru reçoit des affluents drainant la zone karstique (les rivières Motrușor, Motru Sec et Brebina). En aval de Cloșani, la rivière Motru traverse la dépression Baia de Aramă, où les pentes diminuent et le lit s'élargit légèrement, accompagné d'une plaine alluviale. A partir d'Apa Neagră commence le secteur moyen, où la Motru traverse la partie nord-ouest du Piémont Gétique. Son cours est sinueux et bordé d'une plaine d'inondation large. Les principaux affluents sont les rivières Coșuștea (ressortie du plateau karstique de Mehedinți) et Hușnița (drainant entièrement le bas Piémont Gétique). En aval de la confluence de ce dernier affluent avec la rivière Motru, dans la ville de Strehaia, les pentes baissent à 8%, le lit majeur a une largeur de 2 à 3 km et le lit mineur a un parcours sinueux et divagant. La zone de confluence avec la rivière Jiu (au sud de la ville de Filiași), se caractérise par une diffluence, car la rivière Motru se divise en deux bras principaux, une dizaine de km avant l'embouchure avec la rivière Jiu. Les aménagements pour le système hydro-énergétique Cerna – Motru –

Tismana dans son secteur supérieur ont fortement altéré le débit de la rivière Motru dans toutes les phases du régime hydrologique, par le transfert de presque une moitié de son volume vers le bassin de la rivière Tismana. On verra dans le chapitre §5 quel est le taux de diminution du débit moyen annuel de la rivière Motru, conséquence de ces aménagements.

**La rivière Raznic** est le dernier affluent important jaugeé de la rivière Jiu. Il draine le Plateau de Bălăcița, la partie sud-ouest du Piémont Gétique. Son bassin versant a une superficie de 503 km<sup>2</sup>, une altitude moyenne de 200 m et une pente moyenne de 7,6%. Les vallées des affluents de la rivière Raznic sont encadrées par des berges hautes et ont un caractère torrentiel. L'embouchure avec la rivière Jiu est sur le territoire de la commune Breasta, à l'ouest de la ville de Craiova

Sur le côté gauche, **la rivière Jiu de l'Est** est l'une des deux rivières dont la jonction se forme la rivière Jiu. Il draine la partie orientale du bassin supérieur de la Jiu, en prenant ses sources à une altitude de 1520 m dans Massif Culmea lui Pătru. Son bassin versant a une superficie de 470 km<sup>2</sup>, une altitude moyenne de 1187 m et une pente moyenne de 33,3%. Ses principaux affluents sont les rivières Taia, Jieț, Bănița et Sterminos, qui traversent des klippes calcaires en formant des secteurs de gorges. La vallée inférieure de la rivière Jiu de l'Est draine la Dépression Petroșani et héberge des zones d'exploitation du charbon (houille). La confluence entre les rivières Jiu de l'Est et Jiu de l'Ouest pour former la Jiu elle-même est au sud du village Iscroni, à l'entrée dans le secteur des gorges.

**La rivière Gilort** est le plus important affluent de la rivière Jiu sur la partie gauche. Ses sources sont situées à 1800 mètres d'altitude dans le massif de Parâng. Les plus grands affluents sont les rivières Ciocadia et Blahnița. La rivière Gilort draine les versants méridionaux du Massif de Parâng, l'ouest de Subcarpathes Gétiques, la partie centrale – orientale du Piémont Getic, pour se jeter dans la Jiu au nord de la ville de Filiași. Son bassin versant s'étale sur une superficie de 1348 km<sup>2</sup>, a une altitude moyenne de 544 m et une pente moyenne de 103 m/km. Dans le cours supérieur du Massif Parâng (au nord de la ville de Novaci), la rivière Gilort a une vallée montagneuse typique avec des pentes raides, dans les secteurs de gorges, creusés dans les calcaires. Dans le secteur moyen, les berges sont hautes de 2-3 m, ce qui empêche l'inondation du lit majeur (sauf le cas de grandes crues). Toutefois, les versants et les berges des rivières dans ce secteur de piémont sont soumis aux phénomènes morphologiques, de sorte que le volume des alluvions transportées est élevé. Dans le secteur inférieur, la plaine inondable s'élargit jusqu'à 1,5-2 km.

**La rivière Amaradia** est le dernier affluent sur le côté gauche de la Jiu. Elle prend sa source dans la zone de contact des Subcarpathes avec le Piémont Gétique (unité des Collines d'Amaradia), qu'elle traverse du nord au sud. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 826 km<sup>2</sup>, a une altitude moyenne de 241 m et une pente moyenne de 43 m/km. La vallée est profonde avec des berges assez hautes le long d'un cours sinueux, avec des méandres accentués dans le secteur inférieur. La rivière Amaradia n'a pas d'affluents importants. Le plus grand est le ruisseau Poienița dans le secteur supérieur. La confluence avec la rivière Jiu se trouve au nord-est de la ville de Craiova.

Les caractéristiques morphométriques des principaux affluents de la Jiu et de leurs bassins hydrographiques (tirées de la carte topographique et du modèle numérique altitudinal) constituent des paramètres pouvant influencer le potentiel hydro-sédimentaire. A partir de ces caractéristiques de forme, une série de variables morphométriques des rivières du premier ordre et de leurs bassins versants ont été calculées (**Tableau III.8**).

Tableau III.8. Les rivières et bassins affluents d'ordre I de la rivière Jiu (L>30 km et F>100 km<sup>2</sup>)

Sous-bassins	Informations sur la rivière principale							Informations sur le bassin versant							
	Affluent de:		Code cadastrale	L (km)	D (km)	I <sub>moy</sub> (%)	K <sub>s</sub>	F (km <sup>2</sup> )	H <sub>moy</sub> (m)	P <sub>moy</sub> (%)	K <sub>f</sub> (%)	F <sub>f</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>e</sub>	P (km)
d	g														
<i>Jiu de l'Est</i>		x	VII-1.15	29	54	31.8	1.41	469.7	1186.6	33.32	59.3	0.65	0.47	0.91	111.6
<i>Șușița</i>	x		VII-1.25 b	37	113	45.2	1.18	237.8	702.6	23.98	51.8	0.21	0.35	0.51	93.1
<i>Amaradia Pietroasă</i>		x	VII-1.26	41	116	41.0	1.23	252	298.1	6.79	25.3	0.22	0.33	0.53	98.5
<i>Tismana</i>	x		VII-1.31	38	124	18.7	1.38	896.9	535.4	19.47	54.3	0.44	0.44	0.75	160.8
<i>Cioiana</i>		x	VII-1.32	39	143	5.5	1.24	175.2	256.6	10.68	64.7	0.40	0.46	0.72	68.9
<i>Jilț</i>	x		VII-1.33	46	174	4.9	1.33	377.4	245.6	12	23.4	0.26	0.44	0.57	103.8
<i>Gilort</i>		x	VII-1.34	116	192	1.8	1.25	1365.3	512.1	16.29	40.2	0.17	0.25	0.46	262.3
<i>Motru</i>	x		VII-1.36	134	199	9.2	1.63	1893.4	376.6	15.45	35.3	0.18	0.26	0.48	304.5
<i>Argetoaia</i>	x		VII-1.40	50	219	25.3	1.12	249.3	227.6	9.73	24.0	0.13	0.27	0.41	108.2
<i>Amaradia</i>		x	VII-1.42	113	243	7.0	1.4	887.1	264.9	11.6	32.1	0.14	0.22	0.42	223.3
<i>Raznic</i>	x		VII-1.43	58	247	3.4	1.19	503.4	200.4	7.68	5.2	0.20	0.45	0.51	118.5

Les variables calculées sont :,

- **d, g** – (affluent) de droite/ de gauche par rapport à la rivière Jiu
- **L [km]** – Longueur de la rivière principale du sous-bassin
- **D [km]** – Distance entre les sources de la rivière Jiu et la confluence avec l'affluent en cause
- **I<sub>moy</sub> [%]** – Pente moyenne de la rivière le long de son profil longitudinal
- **K<sub>s</sub>** – Coefficient de sinuosité :  $\frac{L}{L \text{ en ligne droite entre la source et l'embouchure}}$
- **F [km<sup>2</sup>]** – Superficie du bassin versant
- **H<sub>moy</sub> [m]** – altitude moyenne du bassin versant
- **P<sub>moy</sub> [%]** – Pente moyenne du bassin versant
- **K<sub>f</sub> [%]** – Coefficient de boisement :  $\frac{\text{Superficie couverte par des forêts}}{F} \cdot 100$
- **F<sub>f</sub>** – Facteur de forme (proposé par **R.E. Horton**) :  $\frac{F}{L \cdot L}$
- **R<sub>c</sub>** – Rapport de circularité (proposé par **V.C. Miller**) :  $\frac{F}{F_c}$ , où F<sub>c</sub> est la superficie du cercle de longueur égale avec le périmètre du bassin
- **R<sub>e</sub>** – Rapport d'élongation (introduit par **S.A. Schumm**) :  $\frac{D_c}{L}$ , où D<sub>c</sub> est le diamètre du cercle de superficie égale avec celui du bassin
- **P [km]** – Périmètre du bassin versant

### 3.6.2. Le réseau de drainage : la densité et la hiérarchisation

Paramètres à la fois hydrographiques et morphométriques, la densité de drainage et la densité hydrographique sont bien liés au débit des rivières et donc, à la dynamique actuelle du relief [Gregory et Walling, 1968; Ichim *et al.*, 1998].

A partir du modèle numérique altitudinal, nous avons calculé la densité de drainage et la densité du réseau hydrographique qui expriment le degré de la fragmentation horizontale du relief [Grigore, 1979; Ungureanu, 1989].

*La densité de drainage* est donnée par toutes les formes négatives de relief capables de guider et d'organiser l'écoulement, résultant de l'interaction entre le relief, la géologie, les précipitations, ainsi que la couverture et utilisation des sols. La densité de drainage exprime le rapport entre la longueur de toutes, les formes de drainage, permettant l'écoulement de l'eau d'une manière canalisée et la superficie considérée.

L'évolution et la configuration *de la densité de drainage* est influencée par la géomorphologie, la géologie, les précipitations, les sols et la végétation, surtout dans les petits bassins versants de montagne. Les conditions hydrogéologiques sont également un élément déterminant de la densité de drainage [Scrădeanu et Gheorghe, 2014]. Dans l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire, ce paramètre est important, car il montre le potentiel de concentration des eaux dans le réseau de canaux assurant les flux hydro-sédimentaires [Day, 1983]. De plus, au niveau de la géomorphologie structurelle, la densité de drainage peut révéler les relations entre les formes et les processus/ facteurs géomorphologiques et la production sédimentaire d'un bassin versant [Van Dijk et Kwaab, 1998 ; Clubb *et al.*, 2016].

Par rapport à la densité du drainage, la *densité du réseau hydrographique* exprime le rapport entre la longueur totale des cours d'eau permanents et la superficie considérée. Ce paramètre offre la possibilité d'évaluer le potentiel d'écoulement dans une région donnée et d'identifier les zones de concentration de l'écoulement. Il peut être utilisé comme un indicateur de l'évolution du relief et du développement du réseau hydrographique [Zăvoianu, 1967].

Le calcul de la densité de drainage et du réseau hydrographique implique la numérisation du réseau de drainage permettant (exprimée par la ligne bleue continue sur les cartes topographiques) et respectivement non-permanente (marqué sur les cartes topographiques avec la ligne bleue interrompue où identifié, selon les formes des courbes de niveau).

La densité de drainage et celle du réseau hydrographique peuvent être cartographiées par plusieurs méthodes : à l'échelle de chaque sous-bassin, par des carrés et par des isodenses [Pișota et Zaharia, 2003].

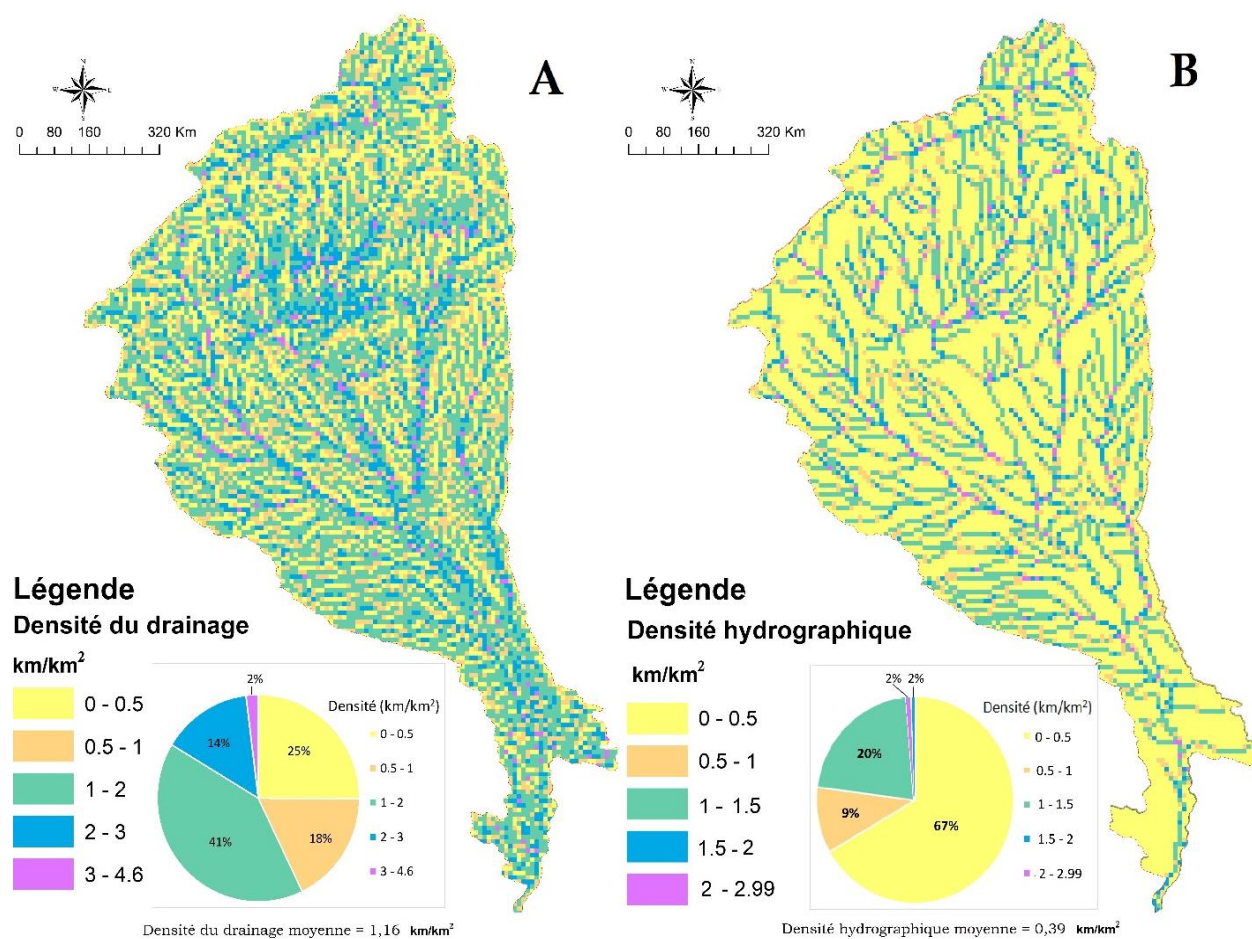
Pour réaliser la carte de la densité de drainage et celle de la densité du réseau hydrographique (ou simplement la densité hydrographique), dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser la méthode des carrés, dont les étapes de travail sont présentées dans *l'Annexe 4*.

La densité du drainage / du réseau hydrographique a été calculée pour chaque carré en appliquant la formule :

$$D = \frac{\Sigma L}{S}$$

où L = la longueur [en km] des formes de drainage (chenaux, talwegs, rivières permanentes ou non-permanents, selon le cas des deux types de densité) et S = la superficie du bassin versant [en km<sup>2</sup>].

Les deux types de densités ont été représentées pour des carrés avec la superficie de 1 km<sup>2</sup> colorés en fonction de la plage de valeurs dans laquelle sa densité se situe (*Figure III.34*).



**Figure III.34.** Les cartes de densité de drainage du réseau (A) et hydrographique (B). Les sources de données numérisées et les étapes du travail sont décrites dans le schéma méthodologique de l'*Annexe 4*

Sur l'ensemble du bassin de la rivière Jiu, les valeurs de la *densité de drainage* (*Figure III.35-A*) les plus élevées (> 3 km/km<sup>2</sup>) sont spécifiques pour le secteur montagneux, en particulier pour les versants orientés vers le sud, avec des pentes fortes, intensément fragmentées par des torrents. Dans les Subcarpates, la dépression de Târgu Jiu se détache avec une très faible fragmentation, tandis que les hautes collines sous-carpatiques et les zones de convergence hydrographique ont aussi une densité élevée de drainage (3-4 km/km<sup>2</sup>). Dans la partie nord-est du Piémont (secteurs supérieurs des bassins des rivières Gilort et Amaradia), l'érosion torrentielle est intense (> 3 - 4 km/km<sup>2</sup>), d'où des valeurs élevées aussi de la densité de drainage influencée par le niveau de base inférieur de la rivière Olt et son affluent Olteț, dont les sources ont avancé de manière régressive par rapport au bassin de la rivière Amaradia, avec un niveau de base plus élevé [Jurcescu, 2013].



Des faibles densités de drainage sont caractéristiques pour les zones basses du piémont, les terrasses et les plaines inondables (0 – 2 km/km<sup>2</sup>). La densité de drainage moyenne pour l'ensemble du bassin de la rivière Jiu est de 1,16 km/km<sup>2</sup>.

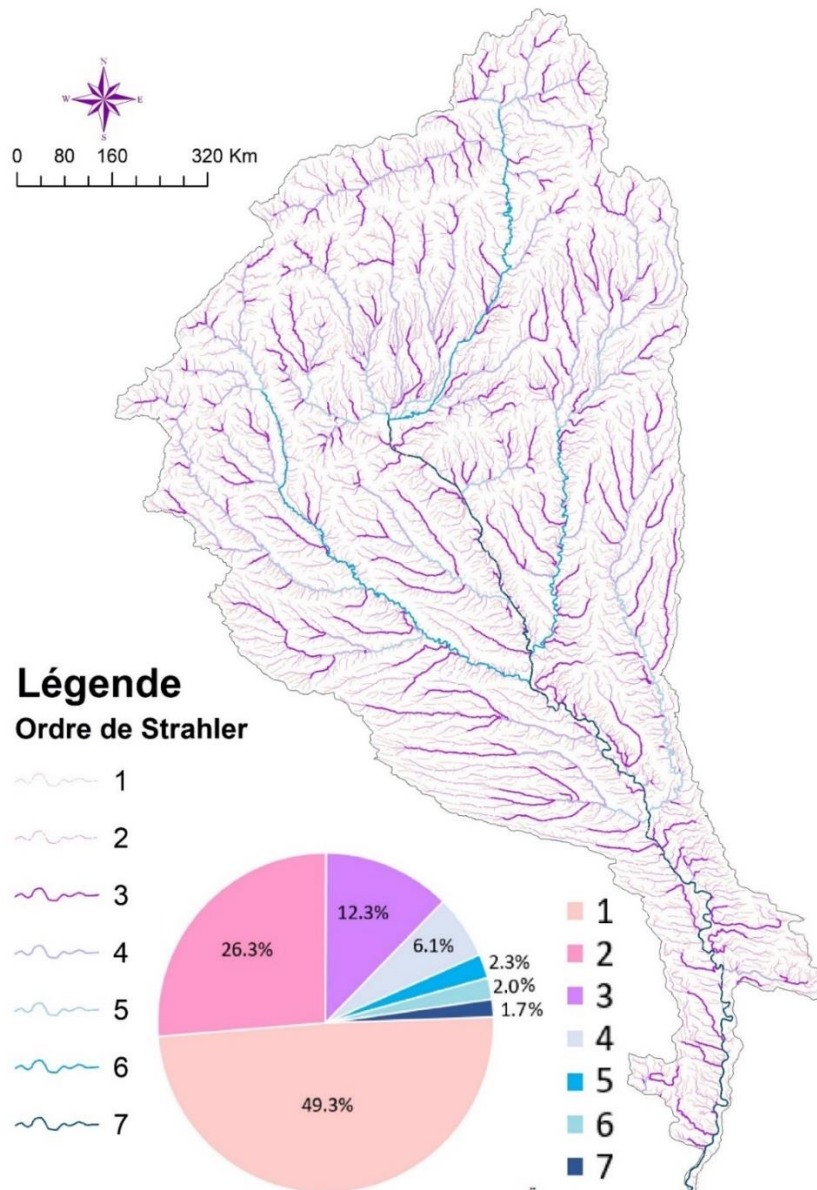
*La densité hydrographique* a été calculée que sur la base des longueurs des cours d'eau permanents. L'extraction du réseau hydrographique a été faite à l'aide d'une procédure automatique à partir du modèle numérique du terrain avec la résolution de 25x25 m<sup>2</sup>. Nous avons défini différents seuils de pixels pour représenter le réseau hydrographique avec plus au moins de détail. Nous avons essayé de trouver les seuils qui rendent les sources des rivières aussi fidèlement que la carte topographique à l'échelle 1:25.000, sur laquelle le modèle numérique de terrain a été construit à partir des courbes de niveaux et des cotes altimétriques. Ainsi, différents seuils allant de 50 jusqu'à 600 pixels ont été essayés pour la reproduction correcte du profil longitudinal des rivières entre leurs sources et les points de confluence. Finalement, le seuil de 110 pixels a été identifié comme rendant le mieux les sources des ruisseaux des secteurs karstiques de montagne (e.g. les sources de Motru et de son affluent Brebina) et le seuil de 60 pixels pour les sources des rivières en haute montagne, sur des roches dures, soumis à une glaciation quaternaire, présentant des situations d'érosion régressif et captures hydrographiques (e.g. les sources de la Jieț et de Gilort dans le Massif de Parâng). Dans le cas de sous-bassins avec des sources situées dans la zone de piedmont ou dans la plaine, la valeur de 150 pixels a été utilisée comme seuil pour la représentation du réseau hydrographique. Les thalwegs ainsi générés ont été considérés pour le calcul de la longueur du réseau hydrographique et ensuite de la densité hydrographique. Les étapes de travail sont détaillées dans la méthodologie présentée dans l'*Annexe 4*.

La densité hydrographique est généralement plus faible par rapport à celui de drainage (*Figure III.35 - B*). L'intervalle 0 – 0,5 km/km<sup>2</sup> est le mieux représenté (environ 67% de la superficie du bassin de la rivière Jiu). Les valeurs les plus élevées sont inférieures à 3 km/km<sup>2</sup> (2% de la superficie totale). Elles sont spécifiques aux zones de confluence et le long du réseau hydrographique. Comme attendu, la densité hydrographique moyenne pour tout le bassin de la rivière Jiu est inférieure à la densité de drainage, atteignant 0,39 km/km<sup>2</sup>.

A partir du réseau de drainage pour le calcul de la densité hydrographique, nous avons classifié le réseau hydrographique selon la méthode de Strahler [[Horton, 1945](#) ; [Strahler, 1952](#)]. Parmi d'autres classifications hydrographiques existantes (Shreve, Gravelius), celle de Strahler est très couramment utilisée, ayant le mérite d'offrir une indication synthétique du degré de développement d'un réseau hydrographique. Dans la classification de Strahler, tout chenal qui n'a pas d'affluent est considéré d'ordre 1. Ensuite, le calcul de l'ordre se fait selon la règle suivante : un chenal d'ordre  $n+1$  est issu de la confluence de deux chenaux de même ordre  $n$  [[Zăvoianu, 1967](#) ; [Pișota et Zaharia, 2003](#)].

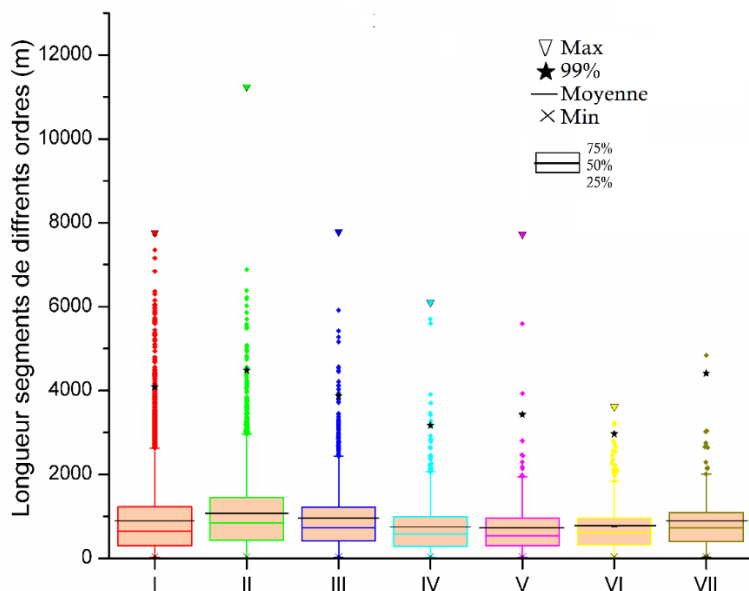
*La classification du réseau hydrographique selon la méthode de Strahler* a été obtenue par une procédure automatique sous SIG, sur la base du réseau hydrographique réalisée précédemment. De manière similaire à la méthodologie de réalisation des cartes de densité, le réseau hydrographique a été défini par l'opération de seuillage à partir de la carte d'accumulation de l'écoulement. Pour la représentation graphique, des conversions du format Raster en format vectoriel des segments de rivières ont été réalisées.

Le premier ordre de la rivière Jiu de l'Ouest est caractéristique au parcours dans le haut bassin supérieur. Elle rejoint avec un ordre de 3 la rivière Jiu de l'Est (qui atteint un ordre maximal de 5), pour après garder ce dernier ordre (de 5) jusqu'à la sortie du secteur supérieur. Le long du secteur sous-carpatique (entre la sortie des gorges jusqu'en aval de la ville de Târgu Jiu), la rivière Jiu gagne un ordre en plus, pour recevoir, après la confluence avec la rivière Tismana l'ordre Strahler final de 7, maintenu jusqu'à l'embouchure avec le Danube (*Figure III.35*). Les deux affluents principaux de la rivière Jiu, la Motru et la Gilort, sont mis en évidence aussi par l'ordre de Strahler élevé. Celles-ci, à côté de la Jiu de l'Est, sont les seules rivières qui se développent jusqu'à l'ordre 6. Les autres grandes rivières principales tributaires de la Jiu ont les ordres suivants : Șușița, Cioiana, Jilț, Amaradia, Raznic – l'ordre 5 ; Amaradia Pietroasă et Argetoaia – l'ordre 4.



**Figure III.35.** La classification du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Jiu par la méthode de Strahler

Les segments d'ordre II ont les plus grandes longueurs, dépassant 10 km (*Figure III.36*).



**Figure III.36.** Statistique des segments de différents ordres selon la classification de Strahler. Relation entre l'ordre Strahler et la longueur du segment

A l'opposé, les segments de rivières de l'ordre 6 sont les plus courts. On s'attendrait, peut-être, que les ruisseaux du premier ordre soient les plus courts, mais en réalité la longueur des segments d'ordre I va jusqu'à 8 km. En moyenne, la longueur des segments de tous les ordres est environ 1 km.

Le **Tableau III.9** synthétise les valeurs des densités de drainage et hydrographique, de la distribution des segments de différents ordres, ainsi que la longueur du plus long chemin d'écoulement, pour le bassin versant de la rivière Jiu et ses sous-bassins principaux.

**Tableau III.9.** Synthèse des indices hydrographiques pour le bassin de la rivière Jiu et ses principaux affluents

Sous-bassin	Densité [km/km <sup>2</sup> ]		Ordre de Strahler	Longueur du plus long chemin d'écoulement (km)
	de drainage	du réseau hydrographique		
<i>Jiu de l'Ouest</i>	1,06	0,39		54,17
<i>Jiu de l'Est</i>	1,01	0,43		37,6
<i>Șușița</i>	1,25	0,38		11,3
<i>Amaradia Pietroasă</i>	1,25	0,47		114,1
<i>Tismana</i>	1,21	0,38		46,8
<i>Cioiana</i>	1,19	0,33		25,8
<i>Jilț</i>	1,07	0,4		46,1
<i>Gilort</i>	1,15	0,4		176,7
<i>Motru</i>	1,12	0,36		119,8
<i>Argetoaia</i>	1,05	0,41		198,8
<i>Amaradia</i>	1,12	0,43		217,5
<i>Raznic</i>	1,15	0,39		55,7
<b>Bassin de la Jiu</b>	<b>1,16</b>	<b>0,39</b>		<b>265,1</b>

On peut noter que pour les bassins versants avec un réseau hydrographique moins développé (ordre de Strahler 4 ou 5), le plus long chemin d'écoulement est assez grand, cela pouvant être expliqué par le fait que la rivière principale reçoit majoritairement des segments de rivières d'ordre inférieur et elle reste au même ordre jusqu'à l'embouchure. Par contre, si on prend l'exemple de la Jiu de l'Est, elle se développe progressivement par l'apport de ses deux grands affluents du même ordre, Taia et Jieț, dont la confluence lui permet d'augmenter son ordre dans le secteur inférieur.

Les analyses morphométriques que nous avons effectuées concernant la densité hydrographique et le réseau de drainage, ainsi que la hiérarchisation du réseau hydrographique, ont mis en évidence la complexité du bassin de la rivière Jiu et les différences entre les sous-bassins en ce qui concerne le degré de développement des chenaux d'écoulement. Ces analyses fournissent des informations utiles portant sur l'organisation du réseau de drainage qui assure les flux hydro-sédimentaires. Nous allons voir quelle est l'influence de l'ordre de Strahler du réseau de drainage et de sa densité sur le potentiel de transfert des sédiments, particulièrement dans les sous-bassins versant modifiés par l'apparition des formes de relief anthropique (les carrières de charbon à ciel ouvert et les tas de stérile) modifiant les trajectoires des flux hydro-sédimentaire, tel comme constaté par [Rădoane et al., \(1995\)](#)<sup>7</sup>.

### ***3.7. Les sols et leur importance hydrologique***

Les sols, par leurs propriétés (texture, structure, capacité de rétention de l'eau) ont un rôle fondamental dans le transfert de l'eau et de matière, à l'échelle d'un bassin hydrographique [[Ping et al., 2005](#)]. Sur le territoire du bassin de la rivière Jiu, il y a une grande diversité de classes et types de sols, dont la répartition spatiale est liée à principalement l'altitude et à la morphologie du relief, ainsi qu'aux conditions locales d'humidité.

#### **3.7.1. La classification génétique des sols**

Avant d'analyser en détail les caractéristiques pédologiques du bassin de la rivière Jiu, il est nécessaire de connaître le système de classification des sols en Roumanie, afin de créer une base de comparaison avec d'autres systèmes taxonomie des sols dans d'autres pays.

En ce qui concerne le système de classification des sols, selon la taxonomie roumaine, les informations sur les types et les classes de sol sont gérées en Roumanie par l'Institut national de recherche et de développement en pédologie de Bucarest (ICPA). La première carte des sols a été publiée entre 1963 et 1994 sous la forme de 50 cartes couvrant l'ensemble du territoire roumain. Le premier système de classification a

---

<sup>7</sup> Dans son livre, Radoane et ses collaborateurs ont analysé la contribution du réseau hydrographique de différents ordres dans le système Strahler à la formation et la délivrance des sédiments. Si les autres bassins de la Roumanie présentent un potentiel de formation et transfert des sédiments qui diminue des têtes de bassin vers les secteurs d'ordres supérieurs, dans le bassin de la rivière Jiu, le réseau de drainage de toutes les 7 ordres contribuent presque de la même façon (entre 95 – 100 %) en tant que sources de sédiments.

été mis au point en 1980 dans un système d'information géographique à l'échelle de 1:200.000 [Munteanu *et al.*, 2005]. Il s'agit d'une classification combinée morphogénétique basée sur les propriétés du sol (caractères morphologiques définis par des horizons diagnostiques), ainsi que sur les processus pédogénétiques [Demeter, 2009].

Pour simplifier le système de classification et pour aligner la taxonomie roumaine en conformité avec celui utilisée au niveau international, la révision de la taxonomie a été lancée en 1995 et a été adaptée à la forme actuelle sur la base des informations contenues dans les 50 feuilles de carte précédentes. Ainsi, en 2003, l'ICPA a adopté une classification moderne intitulée "*le Système roumain de taxonomie des sols*" (SRTS), qui est compatible avec les exigences spécifiées dans la Base de référence mondiale pour les ressources en sols [FAO, 1998]. La nouvelle classification regroupe les sols selon le processus génétique caractéristique et les horizons diagnostiques basés sur des propriétés qui peuvent être mesurées et identifiées sur le terrain, garantissant ainsi la précision et l'objectivité [Oprea, 2013].

La présentation des sols du bassin de la rivière Jiu est réalisée selon la taxonomie SRTS de 2003 créée par l'Institut National de Recherche pour la Pédologie et Agrochimie (ICPA). La résolution spatiale des principaux types de sols est illustrée dans la **Figure III.37** sur la base de la carte roumaine des unités pédologiques à l'échelle de 1:200.000, en utilisant la terminologie de la FAO (1998). Leurs caractéristiques sont tirées des travaux de Demeter (2009), Panagos *et al.* (2011) et Oprea (2013).

Dans le bassin de la rivière Jiu il y a 4 classes principales de sols : les spodosols, les cambisols, les luvisols et les chernosols. A ces 4 classes s'ajoutent autres secondaires.

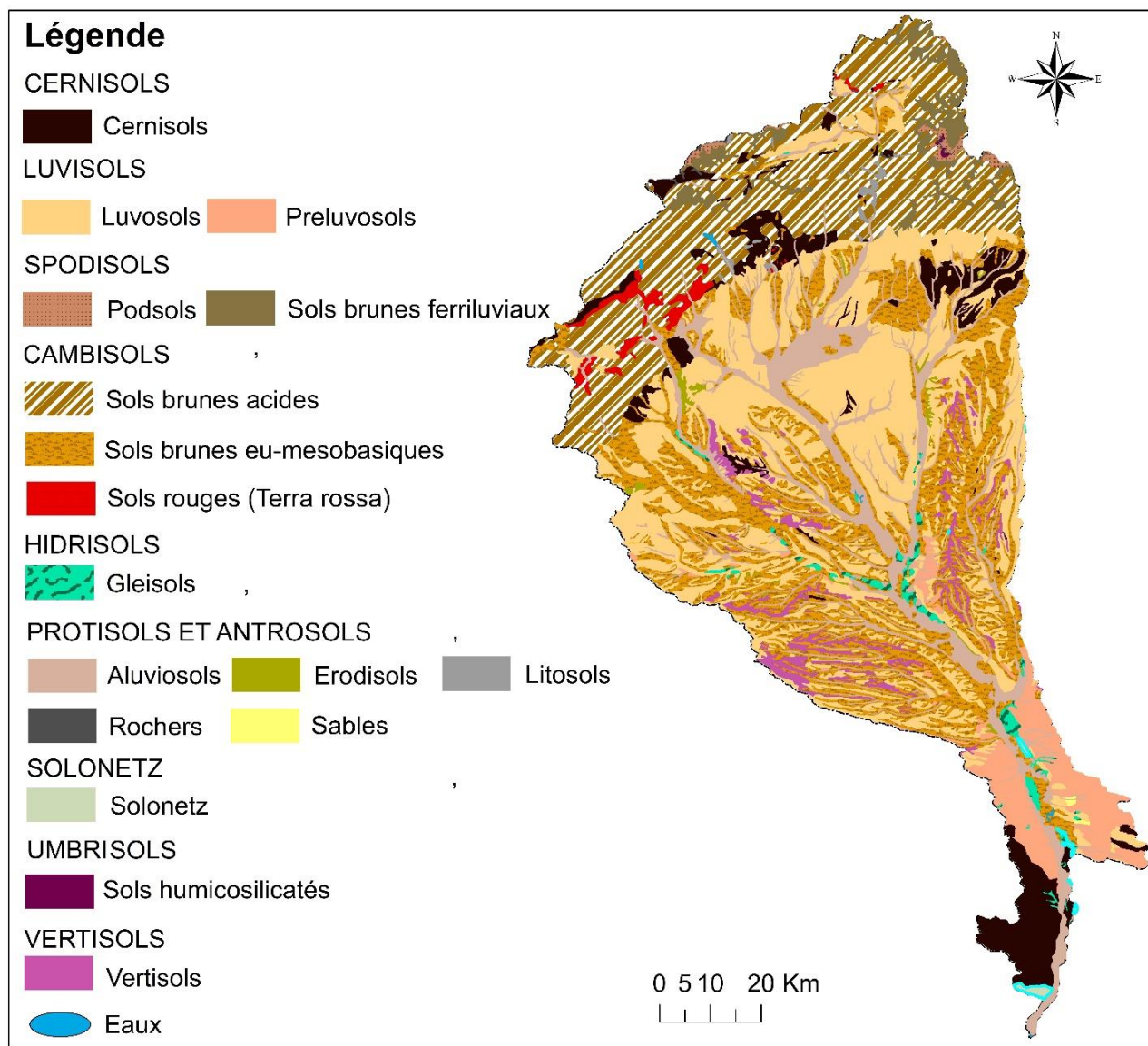
Dans la région de plaine, les types de sols sont répartis en bandes au long de la vallée de la rivière Jiu. La classe dominante est celui des *cernisols*. Dans la partie occidentale, les sols prédominants sont les luvisols gleyiques et les chernozems, avec une haute capacité de stockage de l'eau, ce qui contribue à l'alimentation des rivières par la nappe souterraine durant les périodes sèches. Dans la plaine inondable de la rivière Jiu, le type de sol caractéristique est le fluvisol (ou le sol alluvial) de type calcique.

Dans la zone collinaire (le Piémont Gétique) et subcarpatique, ainsi que dans les dépressions intramontagneuses., il y a le domaine des *luvisols* (eutriques, distriques, leptiques, gleyiques, orthiques). Les luvisols sont notamment importants dans la zone des collines et même dans les Subcarpates, existant en cohabitation avec les sols brunes argilo-illuviaux, dans les zones avec un drainage moins important. Cette classe compte deux types présents dans le bassin de la rivière Jiu : les luvosols et les préluvosols. En tant que localisation, les luvisols occupent des vastes zones dans des interfluves. Les préluvisols occupent des vastes parties des zones collinaires et sont caractérisés par des processus d'argiloiluviation qui conduisent à la formation de l'horizon Bt [Geanana, 2004]. Dans le Plateau de Mehedinți, avec les luvosols existent souvent en cohabitation les sols brunes-rouges (cambisols).

La classe des *cambisols* est représentée par les types des sols brunes acides, brunes eu-mesobasiques et sols rouges (Terra rossa). Les sols brunes acides ont une répartition dominante dans les Carpates (sur les interfluves et les pentes d'altitude inférieure à 1500 m) et les sols bruns eu-mesobasiques sur les interfluves des



Subcarpathes Gétique et du Piémont Gétique. Les sols rouges se trouvent seulement sous le climat d'influence méditerranéenne et sur les versants karstiques du Plateau et des Montagnes de Mehedinți. Dans les dépressions, le type spécifique de luvisol est celui gleyque, avec des caractéristiques similaires aux fluvisols.



**Figure III.37.** La répartition des sols dans le bassin de la rivière Jiu (adaptation selon la carte roumaine des unités pédologiques à l'échelle de 1:200.000)

Dans les massifs les plus hauts, les *spodisols* (podzols à horizon leptique) prennent la place des cambisols, là où l'horizon cambique B est remplacé par l'horizon spodique B (avec un coefficient d'humidité plus élevé et un profil vertical moins développé). En hiver et au printemps, dans ces sols, l'eau s'infiltré dans toute leur épaisseur [Savin, 2008].

La classe des *spodisols* comprend deux types : les podsoles et les sols brunes feriluviaux. La texture prédominante de ces types de sols est limoneuse-sableuse, favorisant un régime hydrique percolatif, leur formation étant liée aux conditions spécifiques du climat de montagne (froid et humide), avec des températures moyennes annuelles entre 2 et 6 °C et les précipitations annuelles au-dessous de 1000 mm [Geanana, 2004].

Les podsoles se trouvent principalement dans le Massif Parâng, à des altitudes supérieures à 1800 m. Ce type de sols se développent sur des versants inclinés ou sur des surfaces d'érosion au fondement des roches acides (des grès de Kliwa, des granites, des granitoïdes). Les sols brunes ferriiluviaux se sont formés sur des dépôts squelettiques sur une géologie dominée par des roches éruptives et métamorphiques.

Dans les dépressions intra-carpatiques et sur les versants avec une orientation sud, nous retrouvons aussi sur des superficies variées des chernosols, dont la présence on peut seulement expliquer par des horizons de sol plus développés et des conditions locales de formation. Les cernisols sont présents parfois sous des zones forestières. Cette classe compte aussi les cernozioms cambiques. Dans les massifs karstiques de la région montagneuse, les rendzines occupent des surfaces importantes, à côté des luvisols chromiques. Dans le Plateau de Mehedinți, le relief est également couvert par des chernozems calciques et par des phaezioms calciques.

Toujours le long des rivières, les *gleisols* sont présents dans les secteurs inférieurs des rivières principales avec des plaines inondables et des conditions stagnantes pour l'eau, près de la superficie.

Dans la Dépression subcarpatique Târgu Jiu et plus en aval le long de la Jiu, on retrouve aussi les *solonetz*.

D'autres sols qu'on peut retrouver sur des superficies réduites sont les *protisols*, qui comptent 5 types : aluviosols, erodisols, litosols, rochers et sables. Les aluviosols accompagnent parfois les rivières dans la zone de piedmont. Ces sols azonaux se développent sur des substrats sableux et de graviers et exercent une influence inverse l'écoulement de surface par leur potentiel d'infiltration et de stockage de l'eau. Les érodisols, litosols et rochers se trouvent sur les crêtes et les versants abruptes de la montagne. Les sables sont spécifiques pour le sud-ouest de la Roumanie, la division de la Plaine de l'Olténie, où des conditions pédologiques et morphologiques pour la formation des dunes y sont caractéristiques.

La classe des *umbrisols* englobe des sols rares, qui se trouvent à des altitudes élevées, parfois à plus de 1800 mètres. Ils exhibent une faible différenciation et se développent sur un relief montagneux très fragmenté. Dans le bassin de la rivière Jiu, nous les retrouvons cependant sur des superficies plus importantes dans les hauts versants du Piémont Gétique, entre le bassin de la Jilț et celui de la Tismana.

Les *vertisols* sont la classe caractérisée par un horizon d'argile et sont caractéristiques aux versants du piémont qui sont affectés par des glissement de terrain.

### **3.7.2. Les groupes hydrologiques des sols**

En fonction de leurs propriétés hydrologiques (capacité de rétention de l'eau), les différents types de sol présentés ci-dessus ont été attribuées à des groupes hydrologiques de sols. Ces groupes ont été initialement établis en fonction de la pluviométrie mesurée, du coefficient de ruissellement et des données issues des mesures d'infiltration [Musgrave, 1955]. Aux États-Unis, les groupes hydrologiques de sols sont reconnues comme facteur principal de l'écoulement et largement utilisées dans la plupart des schémas et modèles hydrologiques.

Dans notre étude, l'intérêt de classer les sols selon leurs propriétés hydrologiques vise à mettre en évidence leur potentiel de drainage. La propriété du sol qui donne la meilleure indication sur et la capacité de rétention ou du drainage de l'eau est la texture (proportion d'argile, de limon et de sable). En fonction de la texture, une série de systèmes de classification pour chaque pays ont été adaptés selon celui appliqué aux États-Unis [USDA, 2017]. Les critères selon lesquels chaque type de sol a été attribué à une des 4 groupes hydrologiques (**A**, **B**, **C**, **D**) sont les suivants [USDA, 2007]: (i) inclusion et transmission de l'eau dans des conditions d'humidité annuelle maximale ; (ii) sol non gelé ; (iii) surface de sol nu ; (iv) gonflement maximum des argiles. La pente de la surface du sol n'est pas prise en compte lors de l'attribution de groupes hydrologiques de sol. La classification roumaine des sols à des fins hydrologiques et hydrauliques n'est pas le même que celle initiale des États-Unis, mais elle est adaptée aux conditions pédologiques en Roumanie [Chendeş, 2007], en utilisant les classes de textures pratiquées par l'ICPA.

Le groupe **A** englobe les sols à texture grossière, qui présentent le potentiel de drainage le plus faible, les groupes **B** et **C** correspondent aux catégories intermédiaires, tandis que la classe **D** comprend les sols avec des textures fines (à base de l'argile), avec un potentiel d'écoulement maximal et une infiltration minimale.

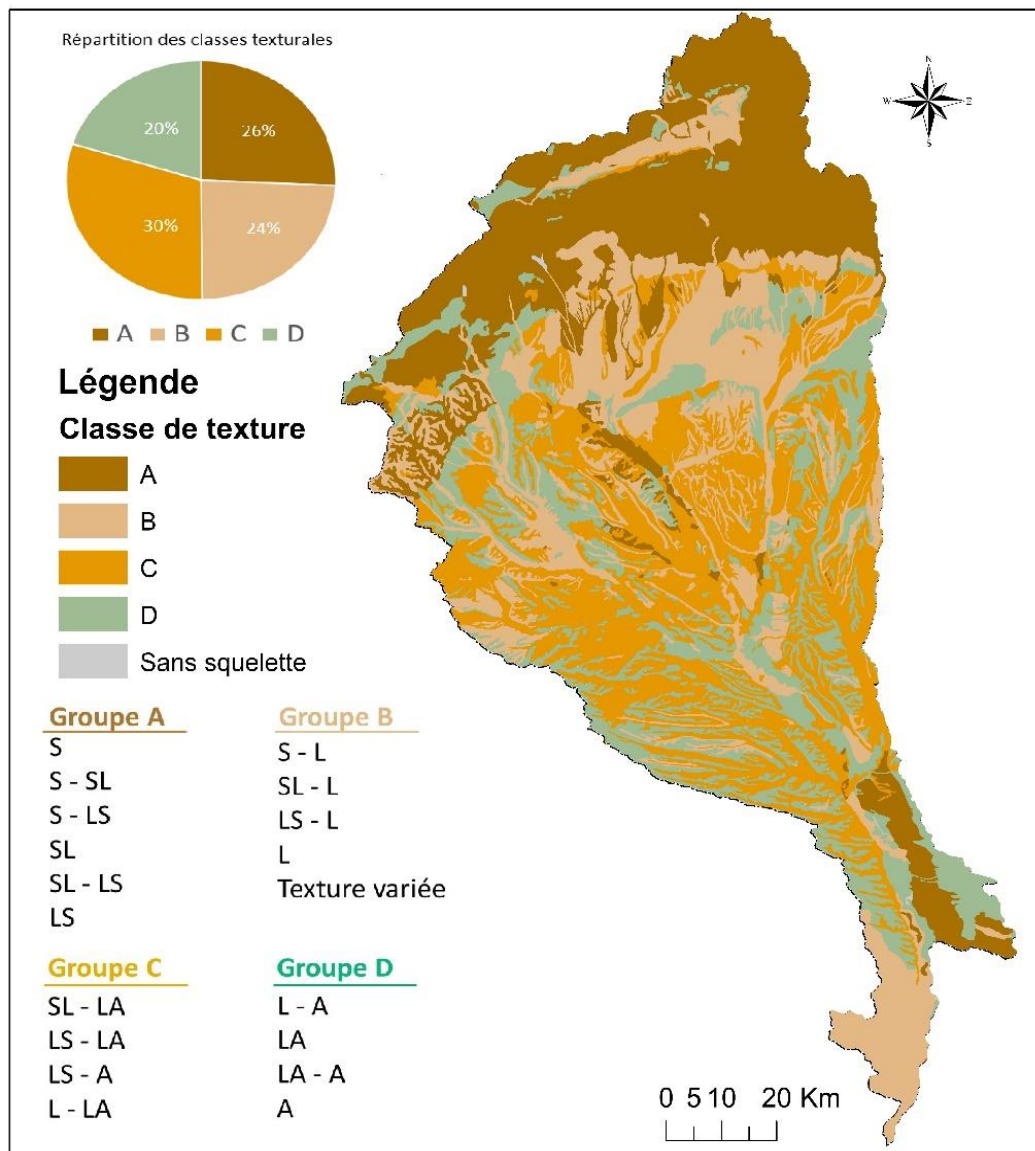
Sur l'ensemble du bassin, on remarque une distribution relativement homogène des quatre groupes hydrologiques du sol (entre 20% et 30%). Le groupe **A** des sols avec le potentiel de drainage le plus faible est le mieux concentré, principalement en deux zones : dans la région montagneuse (la classe des cambisols en général) et dans la partie orientale de la zone de plaine du secteur inférieur du bassin de la rivière Jiu (ce sont les arénosols de texture sableuse).

Le groupe **B** apparaît principalement dans les zones dépressionnaires et sur les interfluves de piémont, ainsi que les surfaces tabulaires de la plaine. Ce groupe englobe les sols à texture moyenne, bien drainés, de profondeur élevée ou moyenne.

Les sols du groupe **C** se trouvent principalement dans les régions des Sous-Carpates et du Piémont Gétique sur des substrats marneux. Les sols de ce groupe ont une structure moyennement fine et un potentiel de drainage légèrement supérieur à la moyenne. L'enjeu hydrologique de ces sols est dû au fait qu'ils apparaissent davantage sur les pentes, en favorisant l'écoulement accéléré et l'érosion.

Enfin, les sols du groupe **D** ont le potentiel de drainage le plus important et un taux d'infiltration très faible lorsqu'ils sont complètement humides. Dans le bassin de la rivière Jiu, ceux-ci sont répartis dans toutes les unités de relief, dans les parties aval des versants, ce qui peut favoriser le développement des processus géomorphologiques de pente. Dans l'extrémité occidentale de la région montagneuse, les sols du groupe **D** se croisent avec les sols du groupe **A** et semblent être liés au relief développé sur les formations crétacées (grès et argiles de la série de Wildflisch). Dans la région sous-carpatiques et de piémont, les sols de type **D** sont bien présents, liés aux marnes et argiles spécifiques pour cet espace.

La **Figure III.38** montre la répartition spatiale dans le bassin de la rivière Jiu des classes hydrologiques des sols et répertorie les 4 groupes de sols hydrologiques et les textures correspondantes.



**Figure III.38.** La répartition des groupes hydrologiques selon les classes texturales (A, B, C et D) du sol dans le bassin de la rivière Jiu

*Les trois abréviations et leurs différents regroupements représentent les trois principales textures de sol, respectivement S – pour la texture sableuse ; L – pour la texture limoneuse ; et A – pour la texture argileuse. Par exemple, pour une texture sableuse-limoneuse – limoneuse-argileuse, on a noté « SL – LA »*

Nous verrons dans les chapitres suivants comment la texture du sol contribue au transport sédimentaire.

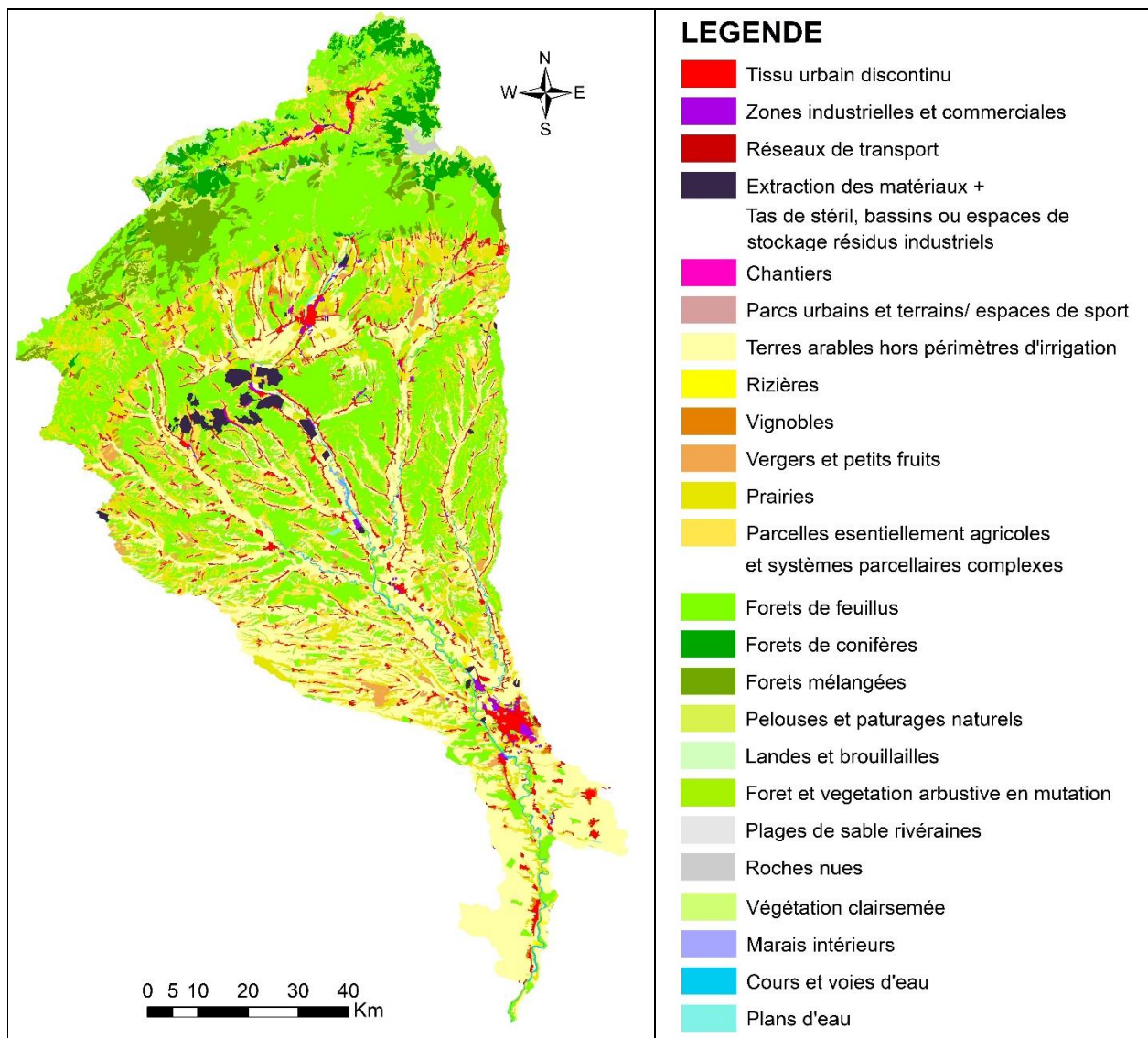
### 3.8. La couverture et l'utilisation du sol

Les catégories de couverture du sol ont été extraites de la base de données européenne Corine Land Cover, 2018 [Agence Européenne de l'Environnement (AEE), 2018]. L'inventaire Corine Land Cover (CLC) a été lancé en 1985 (année de référence 1990) et des mises à jour ont été réalisées en 2000, 2006, 2012 et 2018. Il englobe 44 classes de couvertures terrestres. CLC utilise une unité de cartographie minimale (UCM) de 25 ha pour les phénomènes surfaciques et d'une largeur minimale de 100 m, pour les phénomènes linéaires [Copernicus, 2018]. Les séries chronologiques de données spatiales sont complétées par des couches des



modifications, qui mettent en évidence les changements de la couverture terrestre d'une UCM<sup>8</sup> de 5 ha. La CLC offre des informations pour 39 des pays européens sur la base des images satellitaires à haute résolution. La plus récente base de données, CLC 2018, présente les caractéristiques techniques suivantes : (i) missions satellitaires - Sentinel-2 (principale) et Landsat-8 pour combler les lacunes ; (ii) cohérence temporelle - 2017-2018 ; précision géométrique  $\leq 10$  m (Sentinel-2) ; (iii) UCM = 25 ha ou 100 m<sup>9</sup> ; (iv) précision thématique, CLC  $\geq 85\%$  [Copernicus, 2018].

Dans le bassin de la rivière Jiu, l'occupation des terrains est très diversifiée (**Figure III.39**), étant liée à la variation altitudinale. Selon la base de données européenne Corine Land Cover de 2018, les terres arables occupent plus de 40% de la superficie du bassin, étant dominantes dans le bassin moyen et inférieur.



**Figure III.39.** Carte de l'utilisation des sols dans le bassin de la rivière Jiu (Corine Land Cover Database, 2018)

<sup>8</sup> UCM = Unité de Cartographie Minimale

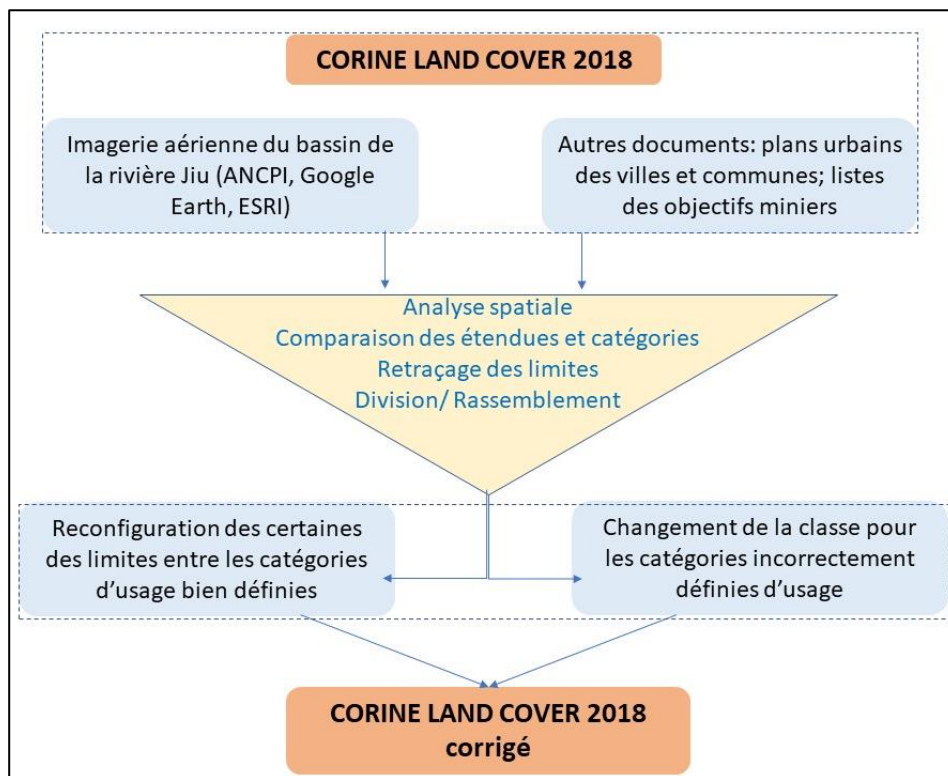
<sup>9</sup> La largeur minimale des éléments linéaires est de 100 m et l'unité de cartographie minimale (UCM) pour les modifications de la couverture végétale (LCC) est de 5 ha



Les forêts détiennent 30%, couvrant notamment secteur montagneux et de piémont, tandis que les zones urbaines et rurales occupent 17%. Les autres types de couvertures du sol occupent des surfaces beaucoup plus petites. Parmi eux, les plans d'eau détiennent environ 1% de la superficie totale du bassin de la rivière Jiu.

Lors de la cartographie des différents types d'occupation des sols de la base de données CLC, on a observé que certaines superficies n'ont pas été correctement définies, en raison probablement des réponses spectrales similaires ou de superficies trop petites pour être correctement identifiées. Même si des erreurs ont été remarquées aussi dans le cas des catégories les plus importantes de couverture/ utilisation des terres (agricoles et forêts), notre intérêt a été porté vers les catégories liées aux activités minières. Les exploitations de charbon dans deux zones clés de source des sédiments du bassin de la rivière Jiu (les mines des bassins de Motru-Rovinari et Petroșani) permettent d'étudier les transferts de matière en utilisant le charbon comme traceur, ce qui donne originalité à notre recherche. Il reste toutefois à notre esprit critique et à la pertinence des certaines des domaines connexes (spectrocolorimétrie, modélisation spatiale de la connectivité sédimentaire, géochimie et pétrologie organique) à constater dans quelle mesure le charbon peut servir comme témoin de la dynamique hydro-sédimentaire.

L'analyse critique des catégories CLC a été menée en plusieurs pas, présentés dans la **Figure III.40**.



**Figure III.40.** Les étapes de réalisation d'une base de données cartographique CLC corrigée

Pour effectuer les corrections, plusieurs documents sur les activités minières et différentes autres sources de données cartographiques ont été consultés. Dans la plupart des cas d'attribution erronée du type d'occupation des terres, la confusion la plus fréquente a été la prise des terres occupées par des tas de stérile des mines et carrières de charbon comme des terrains d'extraction et vice versa. Un autre type d'erreur, moins

grave a été la limite inexacte entre les catégories d'utilisation bien attribuées. Dans ce cas, nous avons seulement ajusté la limite, sans modifier la catégorie dans le tableau d'attributs. Dans le **Tableau III.10**, on a listé les principales corrections dans la base de données CLC 2018 et les sources utilisées.

**Tableau III.10.** Les corrections opérées sur la base de données Corine Land Cover 2018

No	Localisation	Code initial	Catégorie initiale	Code final	Catégorie finale	Sources d'information	Superficie affectée (km <sup>2</sup> )
1	Nord - Ouest de la ville de Craiova et de la commune Ișalnița, vallée de la Jiu	132	Zones de dépôt	511	Réservoir pour retenue de l'eau lors d'inondations	Spatiale : Imagerie aérienne (ANCPI, Google Earth) Fonctionnalité : ANAR, ABA Jiu	1,94
2	Sortie est de la ville de Tg. Jiu	132	Décharges de mines, industrielles ou publiques.	133	Centre - Chantier de construction (future zone résidentielle)	Imagerie aérienne (Google Earth)	0,24
				511	Vallée rivière		0,02
				121	Espace commercial		0,03
3	Sud-Ouest de la ville de Vulcan, Dépression de Petroșani	243	Terrains agricoles	132	Zone de stockage des déchets miniers	Imagerie aérienne (ANCPI) Plan urbain général de la ville de Vulcan <sup>10</sup>	0,09
4	Ensemble d'extraction du lignite (carrière + terril) de Lupoia	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Lupoia	Carte topographique de la Roumanie (1 :25000), Spatiale : imagerie aérienne (ANCPI, Google Earth)	3,27
5	Ensemble d'extraction du lignite (carrière + terril) de Peșteana	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Peșteana	Spatiale : imagerie aérienne (ANCPI, Google Earth) Autres documents :	5,4
6	Dépôt de stérile de la carrière de Roșița	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Roșița	Bibliographie portant sur la localisation, la centralisation, la caractérisation et la gestion des bassins carbonifères (SREM, 2016 ;	1,6
7	Dépôt de stérile de la carrière Timișeni	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Timișeni		4,1
8	Dépôt de stérile de la carrière Fărcășești	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Fărcășești		5,57
9	Dépôt de stérile et bassin de retenue de la carrière Rovinari (ouest)	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Rovinari		1,68

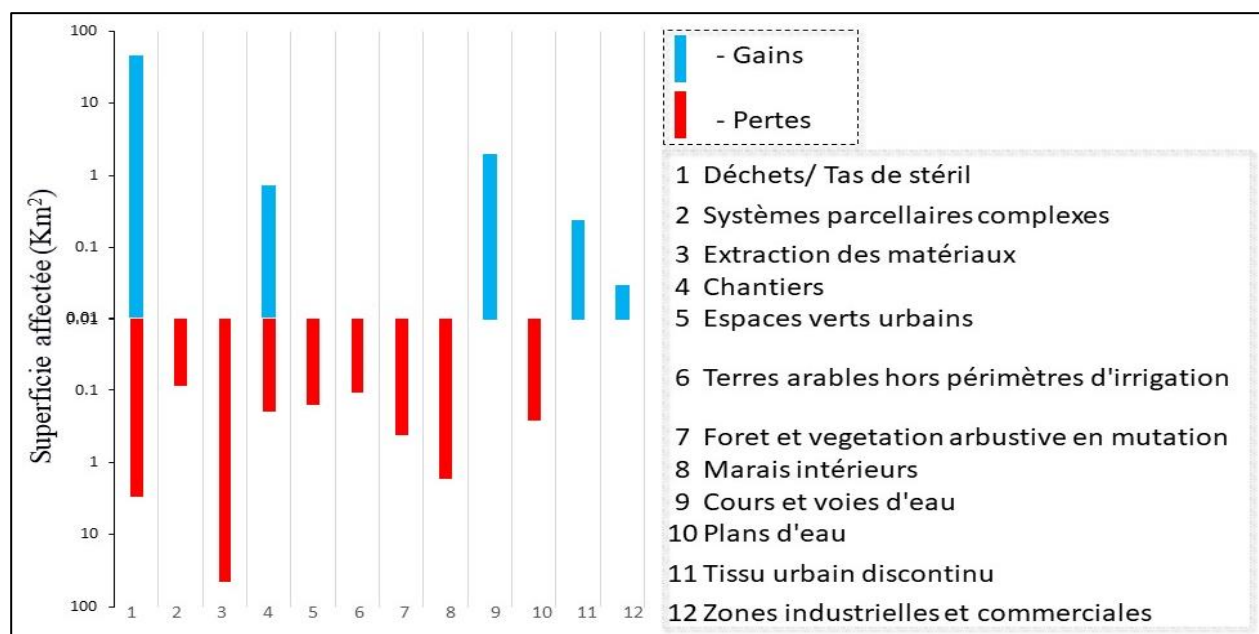
<sup>10</sup> Pour consulter la carte des zones fonctionnelles de la ville de Vulcan (1 :5000), faire référence au [Portail de la ville de Vulcan](#)

10	Ancien dépôt de stérile + bassin de retenue du charbon au nord de Câmpu lui Neag	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la mine souterraine de Câmpu lui Neag		0,75
11	Sud-Est de la ville de Lupeni	131	Extraction des minéraux	132/ 133	Bassin de stockage en construction. Il n'y a pas d'indice d'une zone extractive/ Espaces en cours de développement, excavations de sol		0,32
12	Dépôt de stérile de la carrière Tismana	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Tismana		11,14
13	Terril et bassin de retenue de la carrière Rovinari (est)	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Rovinari		11,05
14	Dépôt de stérile nord Lupeni 1	131	Extraction des minéraux	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Lupeni (plus récent)		0,28
15	Dépôt de stérile nord Lupeni 2	311	Forêt de feuillus	132	Dépôt de stérile minier de la carrière Lupeni (ancien, partiellement végétalisé)		0,04
16	Nord - Ouest de la ville de Craiova –	131	Extraction des minéraux	132	Bassin de décantation des résidus industriels de la plateforme d'Ișalnița		1,63
17	Ouest du village suburbain de la ville de Craiova, Cernele	132	Déchets industrielles ou publiques	411	Ancien méandre, ensuite gravière et au présent un marais	Imagerie aérienne (Google Earth) Carte topographique	0,82
18	Sud de la ville de Craiova	133	Chantier de construction	112	Tissu urbain discontinu en zone périurbaine	Imagerie aérienne (Google Earth)	0,2
19	Nord de la ville de Vulcan	141	Zones urbaines vertes	133	Chantiers de construction	Imagerie aérienne (ANCPI, Google Earth)	0,16
				311	Forêt de feuillus		0,19
				112	Tissu urbain discontinu		0,04
20	La ville de Turceni, coté droite de la rivière Jiu	211	Terres arables non irriguées	411	Marais intérompu. Terre basse de la plaine alluviale pas utilisée en agriculture		0,09
21	Village de Drăguțești	324	Forêts/ arbustes de transition	411	Marais intérieur (bras mort d'une rivière)		0,43
22	Village de Ploșoru	211	Terres arables non irriguées	411	Ancien méandre de la rivière Jiu non-cultivé		0,11

23	Ville de Bumbesti – Jiu (côté gauche de la rivière Jiu)	512	Plans d'eau	411	Pas de lac, mais plutôt une zone humide, possiblement un marais	Imagerie aérienne (Google Earth)	0,27
----	---	-----	-------------	-----	---	----------------------------------	------

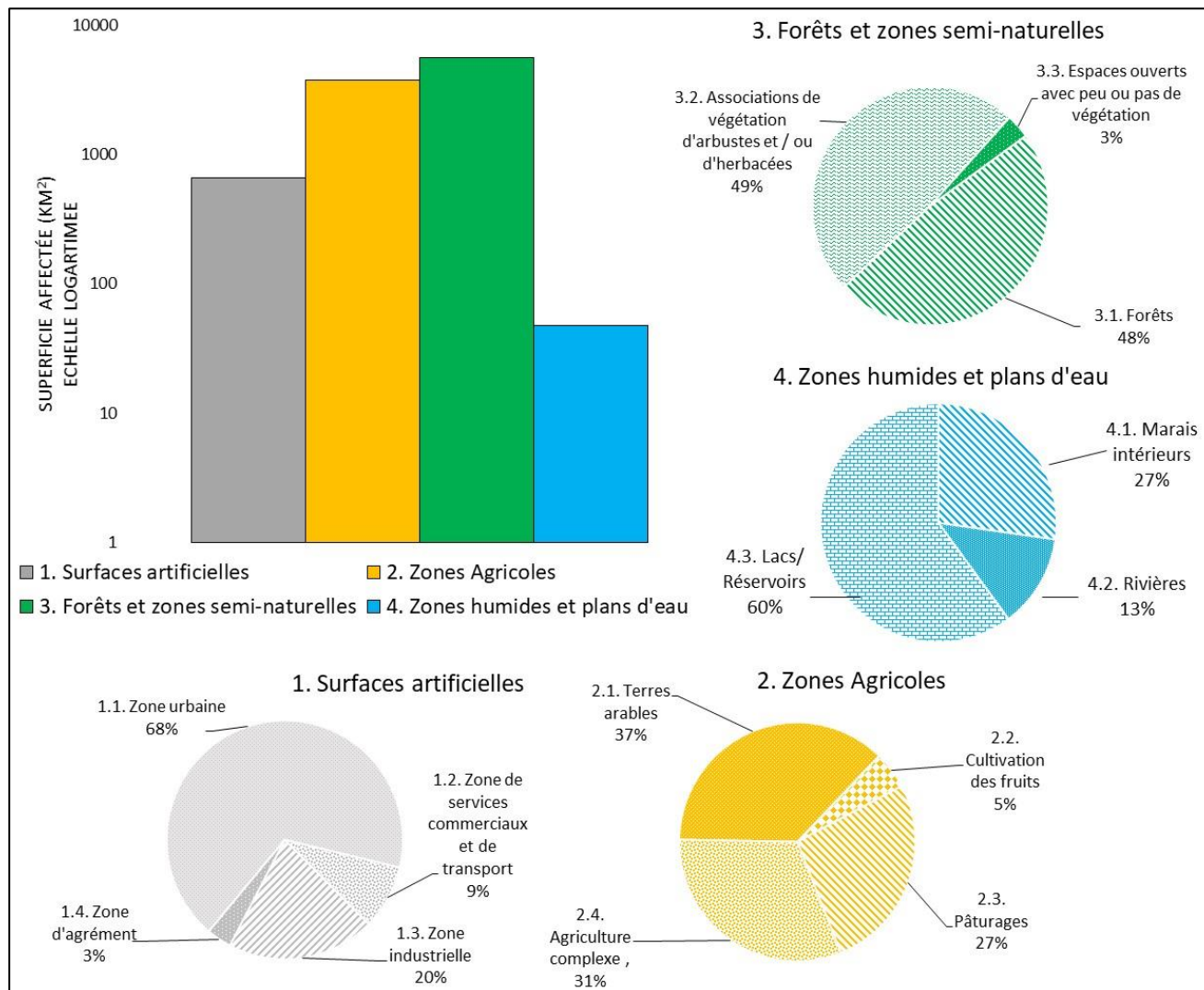
Les modifications qui ont été apportées sont principalement au niveau de certaines des sous-catégories des espaces artificielles, notamment les chantiers et les aires d'extractions des minéraux avec les surfaces destinées aux dépôts du stérile. La classification de la version initiale de la base de données CLC, ne faisait pas toujours de la distinction entre les espaces d'extraction et les tas de stérile afférents, ces derniers étant dans la plupart des situations également classés comme zones d'extraction des minéraux.

Au total, les superficies dont la catégorie entière a changé comptent 0,51% du territoire du bassin de la rivière Jiu. A cette valeur s'ajoutent les superficies affectées par l'ajustement de la limite (classe de couverture ou d'usage du sol correcte dans la base de données CLC), comptant 0,23%. Dans la **Figure III.41**, on présente ces résultats, par type de correction opérée.



**Figure III.41.** Gains et pertes en superficie du changement de classe CLC ou de l'ajustement des limites de certaines classes

Les résultats de la base de données corrigée ont été reportés sur les graphiques de la **Figure III.42**. Nous remarquons que les zones industrielles occupent une place clé dans la catégorie d'espaces artificielles (20%), celles-ci étant principalement liées aux activités d'extraction, de dépôt et d'utilisation du charbon. Au niveau des zones humides et plans d'eau, il convient de noter la dominance des lacs et réservoirs (60%) par rapport au pourcentage des rivières (13%), conséquence des aménagements hydrotechniques sur les rivières principales du bassin. Nous estimons toutefois essentiel de faire la distinction entre les sous-catégories d'utilisation du terrain pour l'industrie du charbon car, dans le chapitre suivant, nous allons exposer les résultats de l'intégration de ces deux catégories différentes dans l'analyse des processus géomorphologiques d'une morphologie et extension différentes sur les dépôts de résidus miniers et dans la proximité des zones d'extraction minière.



**Figure III.42.** La statistique de l'occupation des sols dans le bassin de la rivière Jiu, selon la base de données Corine Land Cover 2018, corrigée (Dans le graphique général de la partie gauche en haut, les superficies de chaque classe ont été représentées en colonnes sur l'échelle logarithmique)

*Les catégories de couverture / utilisation des sols ont été préservées, à la différence de leur regroupement dans les 4 sous – catégories principales. La lecture des graphiques se fait en suivant les quatre couleurs utilisées pour grouper les classes de couverture et usage du sol en : 1/ Surfaces artificielles ; 2/ Zones Agricoles ; 3/ Forêts et zones semi-naturelles ; et 4/ Zones humides et plans d'eau*

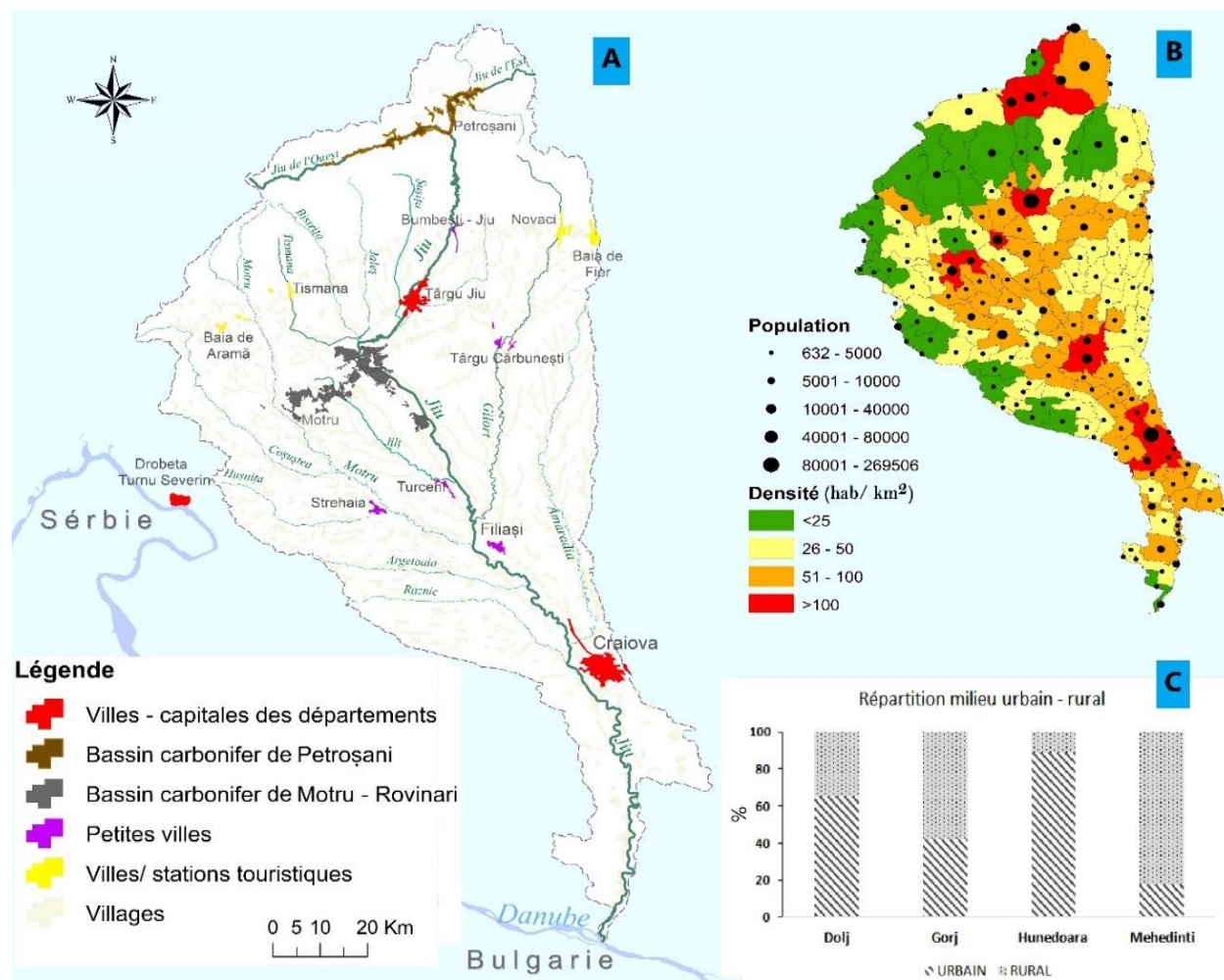
Ces sont bien sûr principalement les deux bassins d'extraction du charbon liés à ces sous-catégories de surfaces artificielles, même si les autres catégories de minéraux extraits ne sont pas non plus négligées (e.g. les gravières, toujours des sites d'extraction d'une dynamique hydro-morphologique différente, qui sont traitées séparément en tant que sources potentielles d'alluvions dans le chapitre §4.2 concernant les processus géomorphologiques).

Suite aux corrections sur les catégories de couverture / utilisation des sols, le taux des changements portant sur la classification des superficies affectées par l'industrie d'extraction de charbon (passage d'une sous-catégorie d'extraction à celle de dépôt ou autre et vice versa) est supérieur à 80%, d'où l'importance de ces corrections pour la problématique de notre recherche.



### 3.9. Pressions anthropiques sur les flux hydro-sédimentaires

Le territoire du bassin de la rivière Jiu a une population d'environ 1 mil. d'habitants, dont la majorité vit dans le milieu urbain (55%). Les centres urbains principaux sont les deux villes chef-lieu de départements, Craiova (269.506 habitants en 2011<sup>11</sup>) dans le département Dolj et Târgu Jiu, dans le département Gorj. Parmi d'autres villes, on mentionne celles de Petroșani, Lupeni, Vulcan, Filiași, Motru, Turceni, Rovinari, Filiași et Târgu Cărbunești (**Figure III.43**).



**Figure III.43.** Unités administratives et population : A. La localisation des villes dans le bassin de la rivière Jiu ; B. La population des unités administratives territoriales ; C. La répartition de la population selon les milieux urbain et rural (synthèse sur les 4 départements) (Sources des données – *INS*)

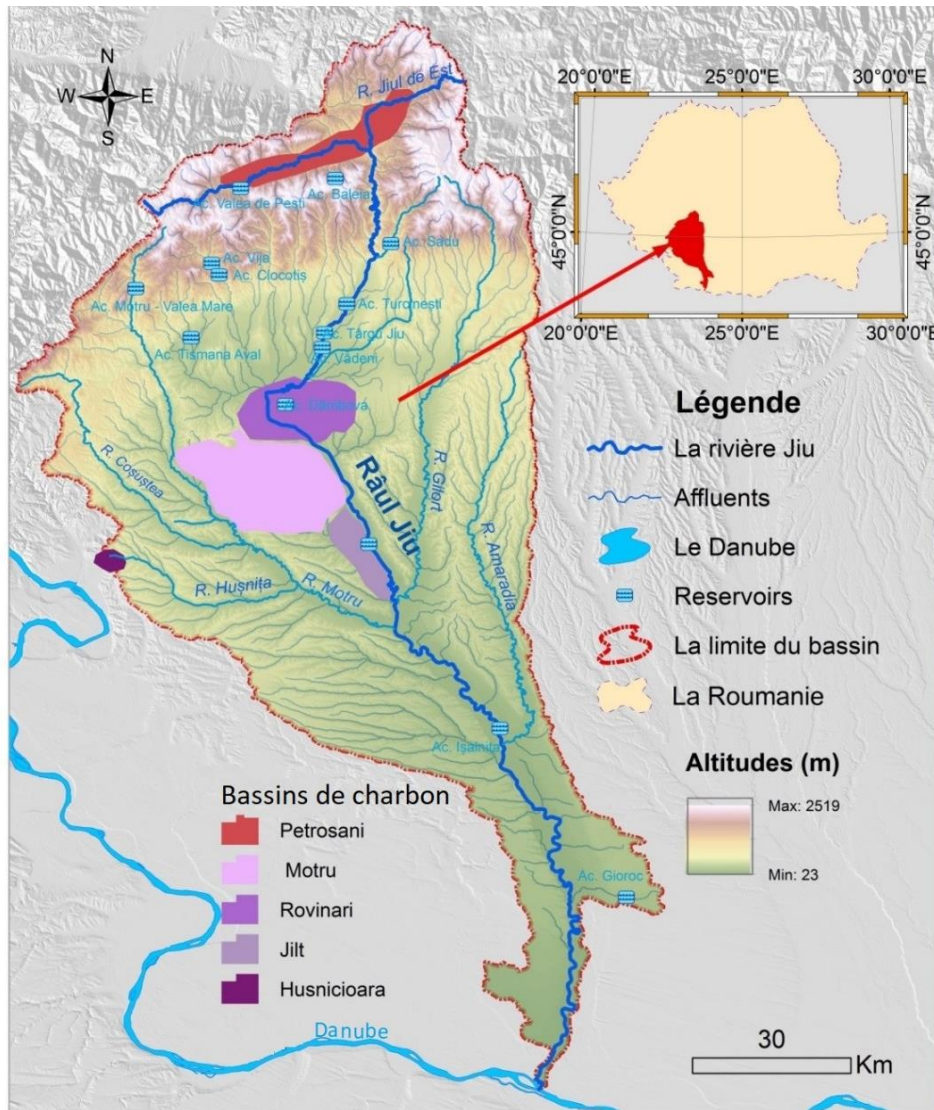
L'apparition et le développement de plusieurs villes concentrées sont liés aux activités industrielles spécifiques de la région : extraction et préparation du charbon, industrie thermoélectrique et chimique. Les activités anthropiques considérées en liaison avec la dynamique hydro-sédimentaire sont les exploitations de charbon, les aménagements hydrotechniques, les extractions de granulats et les déboisements. Dans ce qui suit,

<sup>11</sup> Toutes les données statistiques (population, densité, secteurs économiques) proviennent du [Portail TEMPO Online](#) de l'Institut National de Statistique de la Roumanie (INS) et sont valables pour l'année du recensement le plus récent (2011)

nous allons reprendre chacune de ces activités en termes d'extension spatiale et des enjeux sur les transferts des flux liquides et solides dans le bassin de la rivière Jiu.

### 3.9.1. L'exploitation du charbon

Une particularité économique du bassin de la rivière Jiu est la présence des bassins d'extraction du charbon. Ils se trouvent dans le bassin supérieur de la Jiu, dans la dépression de Petroșani (où il y a principalement de la houille) et dans le secteur moyen de piémont (exploitations de lignite dans le bassin de Motru-Rovinari) (*Figure III.45*). Alors que la houille est exploitée par mines en souterrain, le lignite est extrait aussi par excavations, à ciel ouvert (en carrières), que par mines souterraines.



**Figure III.44.** La localisation des bassins d'exploitation du charbon et des réservoirs dans le bassin de la rivière Jiu

La présence du charbon a conduit à un développement rapide de l'industrie minière, qui a entraîné des changements dans la qualité de l'eau des rivières et les flux hydro-sédimentaires [Ionică *et al.*, 2002; Ionuș, 2011]. Le bassin de la rivière Jiu est aussi connu comme l'un des principaux fournisseurs de sédiments fins dans le Danube roumain. L'activité minière a laissé des traces de charbon dans les dépôts alluviaux de la rivière

Jiu et de ses affluents. Parmi les deux zones d'extraction du charbon, la dépression de Petroșani a été reconnue comme la principale source de pollution des eaux de la Jiu et de ses affluents, tandis que l'influence du bassin Motru - Rovinari, n'est pas encore complètement prouvé et élucidé, d'une part due à la réduction de l'activité d'extraction après 1990 et d'autre part, en raison de l'emplacement des exploitations plus loin de la rivière Jiu et de ses affluents directs [NIST, 2002]. A cause des activités liées à l'industrie minière, la rivière Jiu a été l'un des cours d'eau les plus turbides du pays pendant des décennies (le pic étant dans les années 70 - 80, pendant le grand développement industriel de la période communiste) [Ionică et al., 2002].

Dans le **Tableau III.11**, nous présentons les types de charbon qu'on peut trouver dans le bassin de la rivière Jiu, selon les classifications roumaines et internationales.

**Tableau III.11.** Localisation des gisements de charbon dans le bassin de la rivière Jiu et leur classification selon différents systèmes

Romanian State Standard	ASTM International D 388	Autres sources		Localisation	Propriétés
Lignit	Lignite	Lignite		Rovinari, Jilț, Motru, Hușnicioara, Berbesti	Faible teneur en charbon fixe Composé principalement de matières volatiles
Cărbune brun huilos	Sub-bituminous	Bituminous	Dull-black	Lonea, Petrila, Aninoasa, Codlea-Vulcan	Assez léger avec des niveaux d'humidité assez élevés
Huila	Bituminous		Soft-coal	Lupeni, Vulcan, Uricani	Composé principalement de charbon (80%)
Antracit	Anthracite	Hardcoal		Schela Gorj	>90% charbon, peu de contenu volatil et pratiquement pas d'humidité

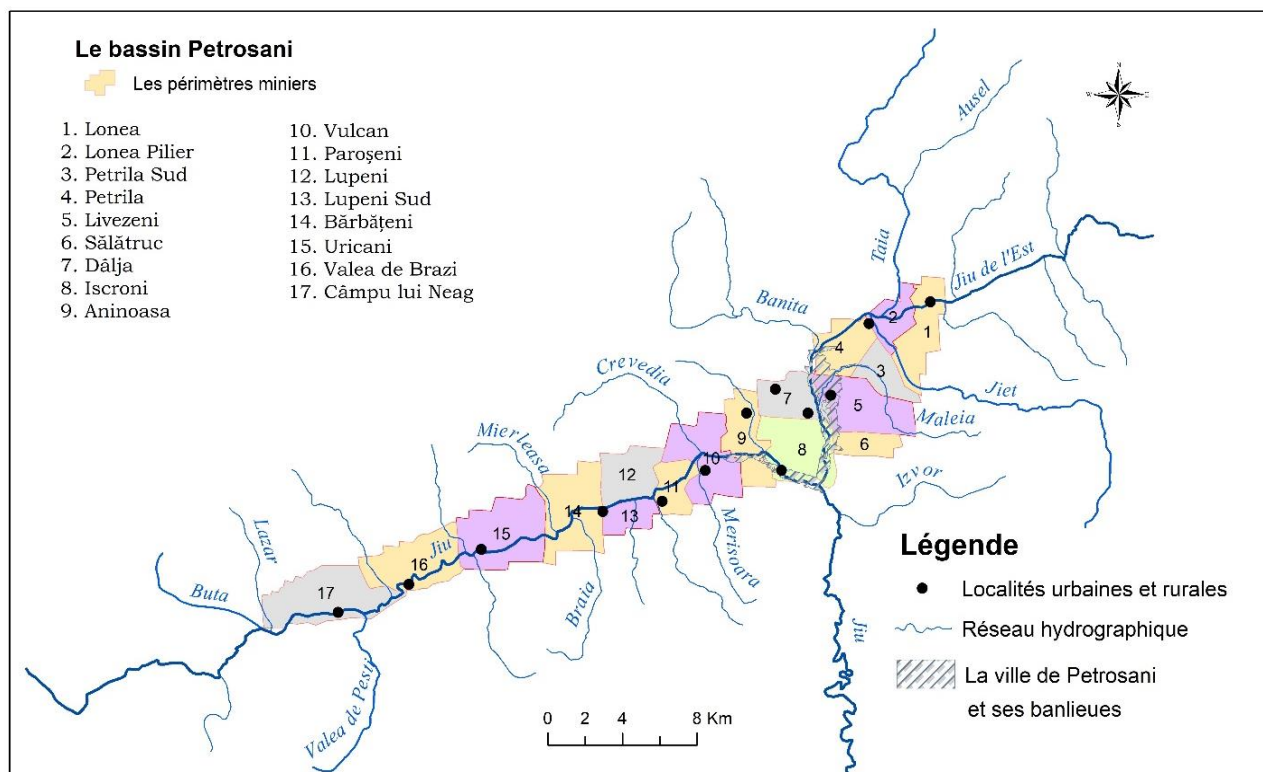
*Le bassin de Petroșani* est un bassin sédimentaire continental, de dépression intramontane, avec des gisements de charbon plus épais (houille), qui commence au Rupélien et se prolonge jusqu'au niveau Badénien, comprenant cinq formations ou horizons productifs [Raileanu et al., 1963; Moisescu, 2006].

Le bassin de Petroșani se trouve dans les Carpates du Sud et correspond géomorphologiquement à la dépression du même nom, entouré des massifs de Parâng, Vâlcan, Retezat et Șureanu. Le bassin est situé à la confluence de la Jiu de l'Est avec la Jiu de l'Ouest, ayant une forme de triangle isocèle allongé, avec un axe de symétrie orienté est-ouest et une base vers l'est (**Figure III.45**). Il a une longueur d'environ 50 km, entre Câmpu lui Neag et Câmpa, et une largeur de base de 9 km, entre Petrila et Livezeni, tandis qu'à l'ouest, à Câmpu lui Neag, il atteint seulement 1 km.

Selon la géomorphologie de la région, la tectonique majeure, les résultats des travaux d'exploration géologique, l'accessibilité ainsi que les possibilités de réalisation des travaux d'ouverture et d'exploitation, le bassin de charbon de Petroșani a été divisé en 17 zones opérationnelles [Petrescu et al., 1987; Preda et al., 1994]. De l'est vers l'ouest, les champs miniers sont les suivants: Lonea, Lonea-Pilier, Petrila-Sud, Petrila, Livezeni, Salatruc, Dalja, Isroni, Vulcan, Paroșeni, Lupeni, Lupeni-Sud, Bărbăteni, Uricani, Valea de Brazi



et Le champ de Neag. Les champs miniers suivants sont toujours en exploitation : Lonea, Petrila, Livezeni, Vulcan, Paroşeni, Lupeni, Uricani. Les limites entre les champs de mines correspondent aux limites naturelles qui délimitent l'exploitation souterraine, telles que les piliers de sécurité ; les rivières affluents de la Jiu de l'Ouest ou de la Jiu de l'Est ou les failles de grande amplitude.



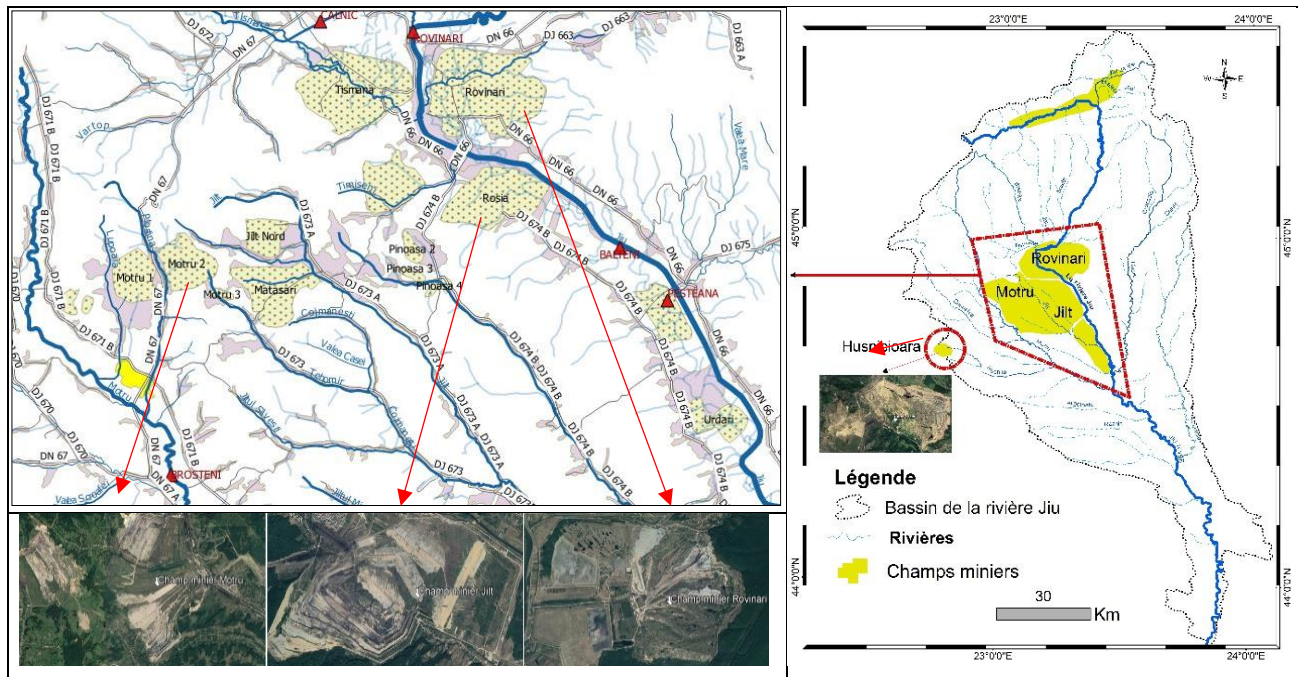
**Figure III.45.** Le bassin charbonnier de Petroşani (Champ minier « La Vallée de la Jiu »)

Même si le Bassin de Petroşani a été un centre minier de référence en Europe de l'Est, il est aujourd'hui confronté aux problèmes économiques liés à la rentabilité de l'exploitation et à la pression environnementaliste de fermeture de la plupart des champs miniers. L'utilisation des huiles du bassin de Petroşani est aujourd'hui strictement énergétique, même si elle a un caractère cokéfiant important. Les bénéficiaires sont le complexe énergétique de Hunedoara, respectivement les usines de Paroşeni et de Mintia. Actuellement, les périmètres planifiés pour la fermeture (Petrila, Paroşeni, Uricani) sont exploités par la Société de fermeture nationale Valea Jiului S.A. Les autres mines du bassin sont exploitées par la Société Nationale de Houille S.A. - Petroşani.

La réduction de l'activité minière n'a pas conduit nécessairement à une diminution de son impact sur l'environnement géographique. Après la fermeture rapide des mines, on n'a plus accordé l'importance nécessaire à la planification rigoureuse de la gestion post activité minière. D'un autre côté, les processus géomorphologiques sur le relief anthropique (principalement les glissements de terrain sur les tas de stérile le long des vallées de la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est), qui continuent de produire leurs effets, ont bénéficié d'un temps suffisant pour passer d'un état latent à un état de manifestation très intense.

L'exemple le plus éloquent est donné par les processus géomorphologiques (glissements, écroulements et subsidences) déclenchés par des mines actuellement fermées, processus qui sont encore actifs et qui contribuent à la perturbation et (ré)activation des zones sources de sédiments.

*Le bassin charbonnier de Motru – Rovinari* occupe une grande partie du bassin de lignite de l'Olténie et il est situé entre la rivière Olt (à l'est) et le Danube (à l'ouest et sud-ouest), dans une région subcarpatique et de piémont (**Figure III.46**).



**Figure III.46.** La carte du bassin charbonnier de Motru – Rovinari et des exemples de photos de chacun des 4 champs miniers

L'activité d'extraction est déroulée par la Compagnie Nationale du Lignite d'Olténie (CNLO). Le groupement sur des bassins d'exploitations a eu des raisons d'organisation, voire administratives. Les critères ayant déterminé la séparation des bassins ont été [Nistor, 2002]: l'ampleur des gisements, l'infrastructure (particulièrement les voies de communication et la possibilité de leur développement en fonction des conditions physiques et géographiques, favorisées par l'existence des cours d'eau longitudinaux), les conditions physiques et géographiques pour le développement des futures villes pour attirer la force de travail (c'est le cas des nouvelles villes de Motru et Rovinari, et de l'expansion de la commune de Mătăsari).

Sur le territoire du bassin de la rivière Jiu, il y a 4 bassins d'exploitation du lignite :

- Le bassin de Motru, situé entre la rivière Motru et l'interfluve Motru-Jilț, avec 2 carrières (Lupoaia, Roșița), 2 micro-carrières privées (Steic et Miculești II) et 3 mines (Ploștina, Leurda et Horăști). On compte aussi 4 mines déjà fermées (Roșița, Leurda, Râpa et Boca), ainsi que des micro-carrières.
- Le bassin de Rovinari, entre l'interfluve Jilț-Jiu et les terrasses de la rive gauche de la Jiu, compte 9 carrières (Tismana I, Tismana II, Pinoasa, Roșia de Jiu, Urdari, Peșteana Nord, Peșteana Sud, Gârla et Rovinari Est) et 2 mines (Negomir et Urdari). Les mines de Rogojel et Fărcășești, ont été fermées.



- Le bassin de Jilț, entre l'interfluve Motru-Jilț et l'interfluve Jilț-Jiu, avec 2 carrières (Jilț Nord et Jilț Sud) et une mine (Drăgotești), avec trois autres exploitations (Tehomir, Cojmănești et Croici). La mine de Mătășari a été fermée, et les micro-carrières de Runcurel, Timișeni et Cerchez ont été aussi clos.

- Le bassin de Hușnicioara, situé entre le Danube et le Motru, avec 2 carrières (Hușnicioara Ouest et Zegujani) et 4 mines (Hușnicioara, Prunișor Ouest, Livezile et Zegujani) ;

L'activité économique prédominante dans ce bassin charbonnier est représentée par l'exploitation du lignite, le début de l'activité minière ayant lieu aux années 1960, avec les premières mines souterraines (la mine d'Horăști, 1962), suivies par un développement de proportions (par le volume excavé et les surfaces affectées) pendant les années 1980. Après 1989, la restructuration du secteur minière détermina un déclin de l'activité d'extraction [Preda *et al.*, 1994 ; Nistor, 2002].

Suite développement des carrières, le relief a été modifié directement, par l'élimination des formes de relief antérieures et l'imposition des nouvelles formes anthropiques (positives - des tas de stérile ou négatives, sous la forme des dépressions anthropiques - les carrières). Selon Fodor (2003), les carrières ont été ouvertes au niveau des plaines d'inondation ou étendues sur les versants, jusqu'au niveau des interfluves, et, dans certains cas, les interfluves ont été totalement éliminés (par exemple l'interfluve entre la Vallée de Lupoița et la Vallée de Roșița). Un cas particulier est celui des carrières situées à l'extérieur de l'unité, dans la plaine d'inondation et au niveau des terrasses de la rivière Jilț (les carrières de Roșia et Rovinari Est).

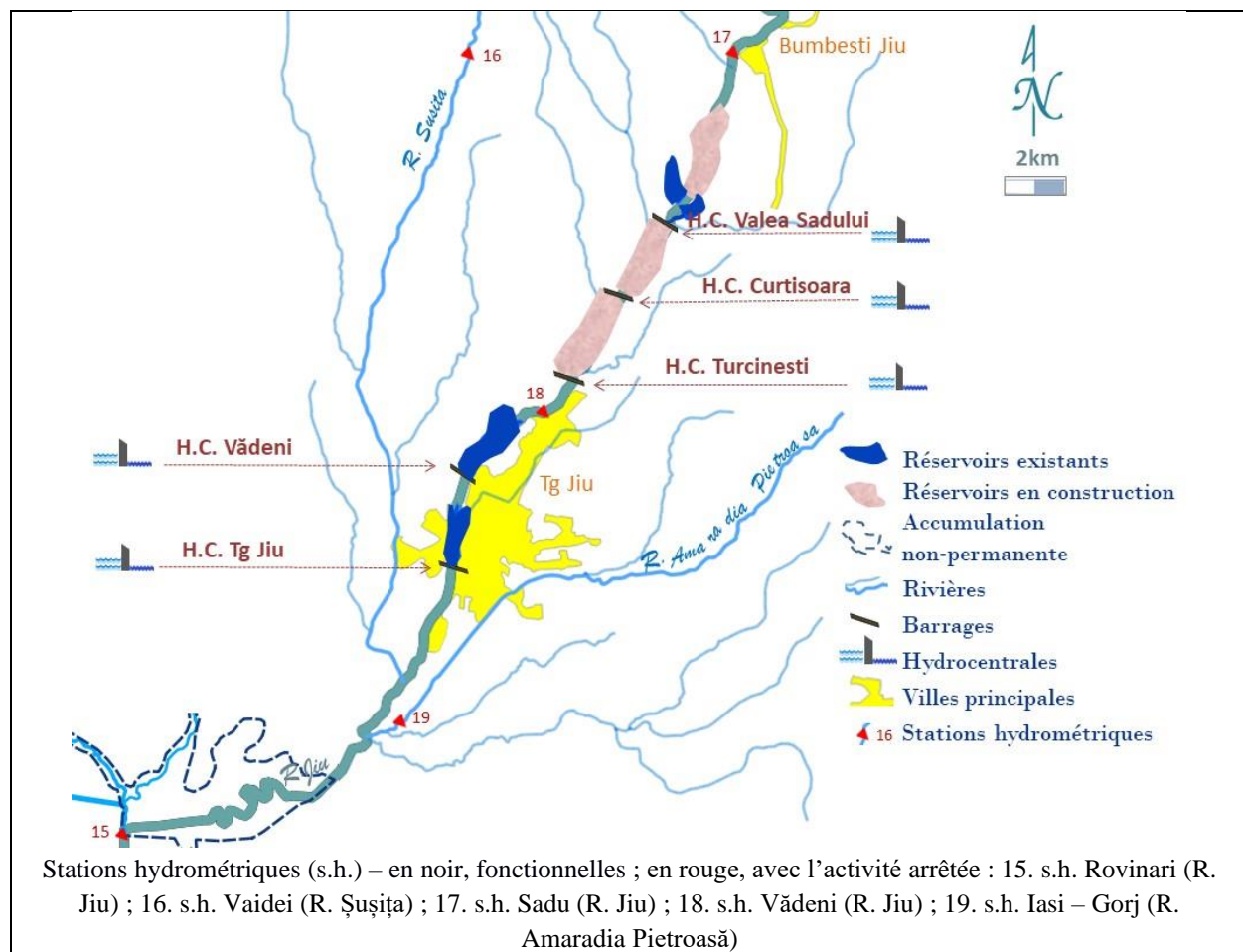
L'industrie minière dans le Bassin de Motru – Rovinari s'est imposée par un paysage spécifique, générant une influence immédiate et très visible sur le relief, à travers les processus nouveaux qui s'installent sur les formes de relief créés. Les carrières de lignite, les mines de houille et de lignite, ainsi que les formes de relief anthropique associées représentent des objectifs anthropiques avec un impact majeur sur l'environnement. Une manière dans laquelle le relief radicalement modifié par les activités d'excavation est représentée par les travaux préparatoires, nécessaires pour l'ouverture d'une carrière [Nistor, 2002], impliquant la déviation des cours d'eau (par exemple, la Vallée de Tismana), la régularisation des rivières, ou la création des nouvelles rues. L'influence indirecte sur le relief des exploitations à ciel ouvert se réalise par les processus géomorphologiques comme les coulées, les glissements, ou l'érosion en nappe la manifestation sur les versants des carrières. Malgré la diminution de l'exploitation du charbon, à partir des années '90, l'impact géomorphologique sur les rivières n'a pas cessé. La fermeture des mines souterraines a été réalisée afin de maintenir les exploitations à ciel ouvert, qui sont devenues plus intenses, raison pour laquelle les surfaces de terrain directement affectées par l'exploitation (affectées par l'excavation du charbon et par le stockage des déchets) ont augmenté. Dans beaucoup de champs miniers, il y a plusieurs situations de superposition des activités minières en souterrain et à ciel ouvert (des carrières et des terrils), des zones caractérisées par une vulnérabilité aigue face aux glissements de terrain.

### 3.9.2. Les aménagements hydrotechniques

A part l'exploitation minière, d'autres pressions anthropiques impactent la dynamique hydro-sédimentaire dans le bassin de la rivière Jiu, dont les travaux hydrauliques et hydrotechniques responsables des perturbations des flux liquides et solides [Horvath, 2008; Uscătescu, 2013], ou de l'interruption des connexions longitudinales avec le système hydro-morphologique [Rădoane et Rădoane, 2007].

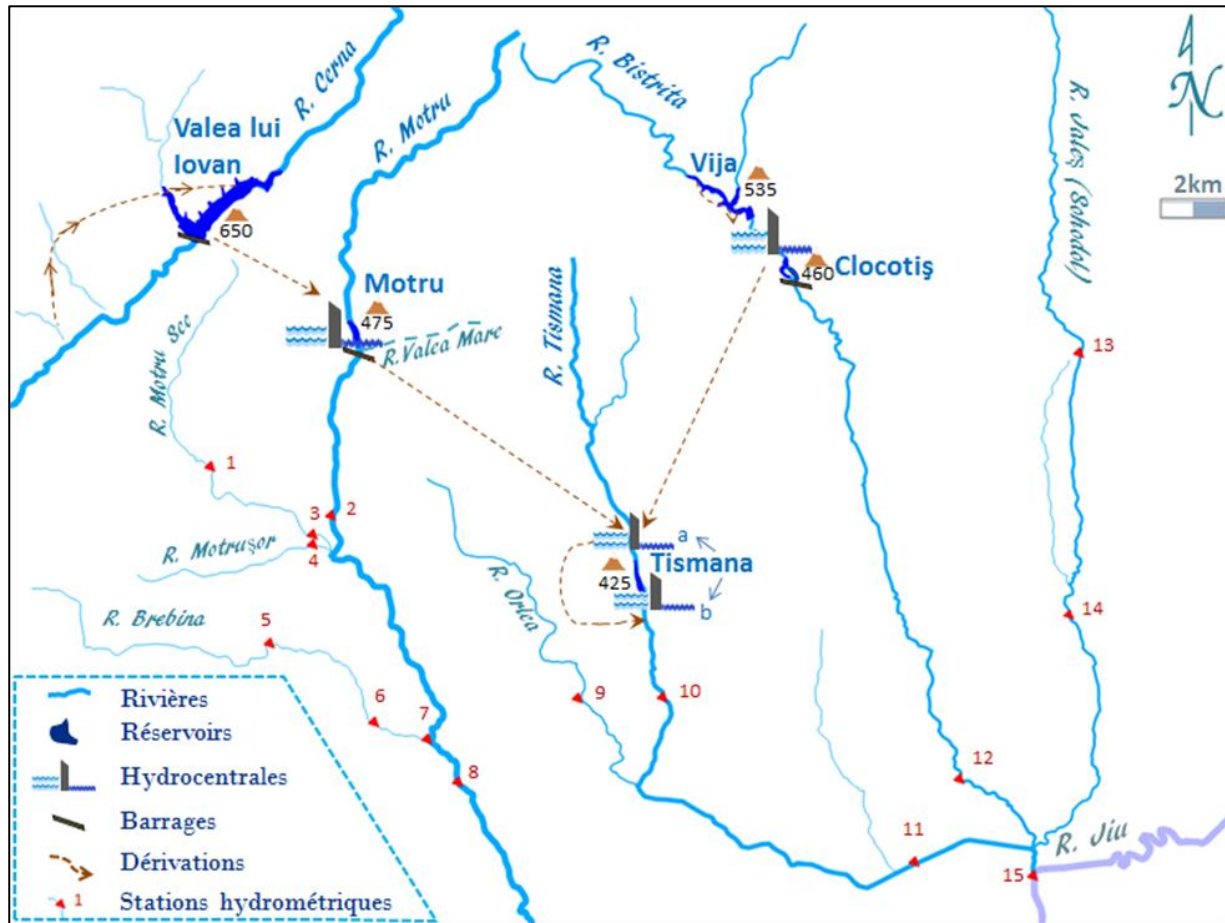
L'écoulement des rivières dans le bassin hydrographique de la Jiu est assez fortement affecté par le grand nombre de travaux énergétiques et de défense contre les inondations, qui ont modifié la géométrie des chenaux par la régularisation et l'apparition des réservoirs et des barrages. Les effets sur l'écoulement sont le changement dans la variation temporelle du volume de l'écoulement pour les sections en aval des aménagements réalisés. Dans le schéma d'aménagement du bassin de la rivière Jiu on observe qu'il y a tous les types de modifications dans le régime naturel de l'écoulement (*Annexe 6*) : réservoirs ; biefs, dérivations, prises de captage des débits qui sont redistribués vers d'autres bassins hydrographiques voisins.

L'artificialisation de l'hydrologie est marquée dans tous les trois secteurs, surtout sur le tronçon aval des montagnes. Dans le secteur d'environ 30 km entre la sortie des Carpates et la ville de Târgu Jiu, la rivière Jiu est presque entièrement aménagée (*Figures III.47*).



**Figure III.47.** Aménagements existants ou en construction sur la rivière Jiu entre la sortie du secteur montagne et la ville de Târgu Jiu

Une deuxième zone fortement aménagée (avec des conséquences indirectes sur la dynamique hydro-sédimentaire) se trouve dans la partie centre-ouest du bassin. Les aménagements impactent les affluents de la Jiu (les rivières Motru, Tismana), ainsi que la rivière du bassin voisin, Cerna (**Figure III.48**). Le complexe hydro énergétique Valea Mare (Cerna – Motru – Tismana) englobe un ensemble de travaux conçus pour répondre aux besoins en eau dans le bassin moyen de la rivière Jiu et pour la production d'énergie.



Stations hydrométriques affectées					
1	Aval Valea Pietrii	6	Brebina	11	Câlnic
2	Cloșani	7	Tarnita	12	Telești
3	Motru Sec	8	Târmigani	13	Runcu
4	Motrușor	9	Celei	14	Stolojani
5	Bratilov	10	Godinești	15	Rovinari

**Figure III.48.** Schéma de l'aménagement hydrotechnique complexe Cerna - Motru – Tismana

Comme ces besoins en eau sont supérieurs aux volumes que la Jiu pourrait assurer par l'aménagement complexe Cerna - Motru – Tismana, des débits importants sont transférés de la rivière, du bassin versant voisin, et du bassin supérieur de la rivière Motru. Ainsi, le débit d'eau dans le secteur moyen de la Jiu a été multiplié par trois, en particulier pour les centrales thermiques de Rovinari, Turceni, Ișalnița et la plate-forme industrielle de Craiova. Quatre centrales hydroélectriques sont liées au système d'aménagement, en utilisant le potentiel hydroélectrique des rivières Cerna, Motru, Tismana et Bistrița ainsi que leurs affluents. Dans le Tableau de l'Annexe 5, les caractéristiques des réservoirs du bassin de la rivière Jiu sont synthétisées.

L'aménagement des barrages et réservoirs a comme conséquence la réduction du transport solide des rivières en aval<sup>12</sup>. Comme réponse à toutes les activités influençant le régime hydro-sédimentaire, l'équilibre dynamique de la rivière et les enjeux anthropiques associés aux processus d'érosion, transport et stockage des sédiments sont à débattre dans les chapitres suivants.

### 3.9.3. Les changements dans la couverture forestière

A cause de la gestion fluctuante des activités minières dans la période contemporaine après les années '90, avec les changements dans le régime juridique de la propriété en Roumanie, des zones forestières importantes ont été éliminées. La mauvaise gestion des domaines forestiers est en mesure d'affecter les flux liquides et solides des rivières.

#### 3.9.3.1. Considérations générales

Vue l'importance de la couverture forestière pour les cycles de l'eau et la stabilité des versants, nous avons analysé les possibles influences des changements de la couverture forestière sur la dynamique hydro-sédimentaire dans la partie supérieure du bassin versant de Jiu (2540 km<sup>2</sup>), pour la période entre 2000 et 2012. Tandis que la relation globale entre les forêts et l'écoulement de l'eau joue un rôle essentiel dans les actions envisagées par le Plan de Gestion des Bassins Versants de la Roumanie dans le secteur supérieur (montagneux) de la rivière Jiu, ce concept d'écosystème dual n'a été employée que rarement dans l'analyse de l'interaction entre les zones forestières et les flux solides et liquides des cours d'eau [EASAC, 2009; ANAR, 2016]. Les écosystèmes forestiers sont impliqués dans le maintien et le réglage du cycle de l'eau et, en même temps, stockent et filtrent une grande quantité d'eau et de sédiments [Hepelwa *et al.*, 2014].

Dans un bassin versant montagneux, il y a un lien étroit entre les forêts et l'eau, particulièrement dans des zones comme celles de formation des eaux de source, les secteurs des rivières touchés par des aménagements hydrotechniques ou les pentes vulnérables à l'érosion [Munteanu *et al.*, 2014]. Également, toute forêt affecte, dans une certaine mesure, les caractéristiques hydrologiques, vu le fait qu'elles jouent un rôle déterminant dans l'écroulement de l'onde par le stockage de l'eau sur les versants, le contrôle des débits solides et le maintien de la qualité des environnements humides [Petrișor, 2015]. En Roumanie, après la chute du communisme, en 1989, époque à laquelle la gestion des forêts, se trouvant dans la propriété de l'Etat, avait été réalisée d'une manière assez sophistiquée, un nombre de changements structuraux se sont produits [Bossard *et al.*, 2000; Kummerle *et al.*, 2009]. Ces changements ont été générés par le processus de restitution des propriétés, qui a conduit à une fragmentation de l'habitat forestier à cause du transfert de nombreuses forêts dans la propriété des particuliers [Kummerle *et al.*, 2009; Petrișor, 2015].

Des études antérieures dans le bassin supérieur de la rivière Jiu [Moroșanu, 2017; Moroșanu *et al.*, 2017] ont montré les zones où les forêts ont subi des changements entre 1990 et 2012, en relation avec la

---

<sup>12</sup> A part les aménagements qu'on vient de mentionner dans le secteur moyen de la Jiu (entre Bumbesti Jiu et Ișalnița), il y a, dans le secteur supérieur des gorges de la Jiu, une chaîne d'ouvrages hydroélectriques en construction.

topographie locale (vallées, interfluves, secteurs d'érosion, etc.) et le teneur en humidité par l'indice NDWI<sup>13</sup>, ainsi que les tendances dans l'évolution des débits des alluvions en suspension.

La disparition des forêts des zones riveraines et des bassins peut entraîner de futurs risques hydromorphologiques majeurs du fait de la perte de protection offerte par la forêt face aux phénomènes d'érosion hydrique, de mouvements gravitationnels et de transport alluvionnaire. Dans la même étude par [Moroşanu, 2017](#)), nous avons trouvé un lien entre le type de surface et le secteur de la vallée.

### ***3.9.3.2. Où chercher la relation couverture forestière – flux hydro-sédimentaires ?***

En observant dans nos analyses antérieures une certaine proximité entre les changements forestières et les zones sources potentielles d'érosion hydrique (et donc de sédiments), nous avons corrélé l'indice NDWI et la couverture forestière pour cartographier les zones où la teneur en eau a changé avec les changements forestiers ([Moroşanu, 2017](#)). Compte tenu des résultats obtenus dans le même secteur du bassin de la rivière Jiu, nous nous sommes ensuite tournés vers la recherche d'un possible influence de ces changements sur la dynamique de la concentration en sédiments en suspension, en explorant les chroniques des débits d'alluvions en suspension aux stations hydrométriques du bassin supérieur de la Jiu ([Moroşanu et al., 2017](#)). Dans la présente étude nous sommes restés toujours dans le bassin supérieur de la rivière Jiu.

La position et l'étendue du bassin supérieur de la rivière Jiu (2.540 km<sup>2</sup>) ont été détaillées dans le chapitre §3.6. La morphologie du bassin supérieur de la Jiu est représentée par un relief développé soit sur des calcaires, soit sur des roches cristallines massives, tandis que le secteur qui croise la dépression de Petroşani, au long du Jiu d'Est et du Jiu d'Ouest est formé sur des dépôts sédimentaires triasiques (une vallée large, vulnérable aux crues). L'altitude de la zone d'étude varie entre 2.519 mètres (le pic Parângul Mare) et 250 mètres dans la dépression de Petroşani. Les cours d'eau les plus importants (le Jiu d'Ouest, le Jiu d'Est et le Jiu) ont des pentes qui varient entre 30 et 18‰, mais les affluents présentent des vallées étroites, avec un profile en « V » et des pentes allant jusqu'au 125‰ [[Moroşanu et al., 2017](#)].

### ***3.9.3.3. La méthodologie suivie***

Afin d'évaluer les changements dans la couverture forestière et la dynamique hydro-sédimentaire, nous avons utilisé la base de données Corine Land Cover et des images satellitaires, qui ont été exploitées avec les logiciels ENVI 4.7 et ArcGIS 10.0, employant. Les jeux de données cartographiques reflétant ces changements sont disponibles sur la page web Copernicus Land Monitoring Services, en format Raster et Shapefile [[Bossard et al., 2000](#)]. Pour l'analyse cartographique, le format vecteur avec une projection azimutale Lambert, spécifique pour l'Union Européenne, a dû être changé dans la projection roumaine Stéréo 70. Pour diminuer le risque lié aux incertitudes spatiales des polygones représentant la catégorie « forêts », nous avons réalisé des

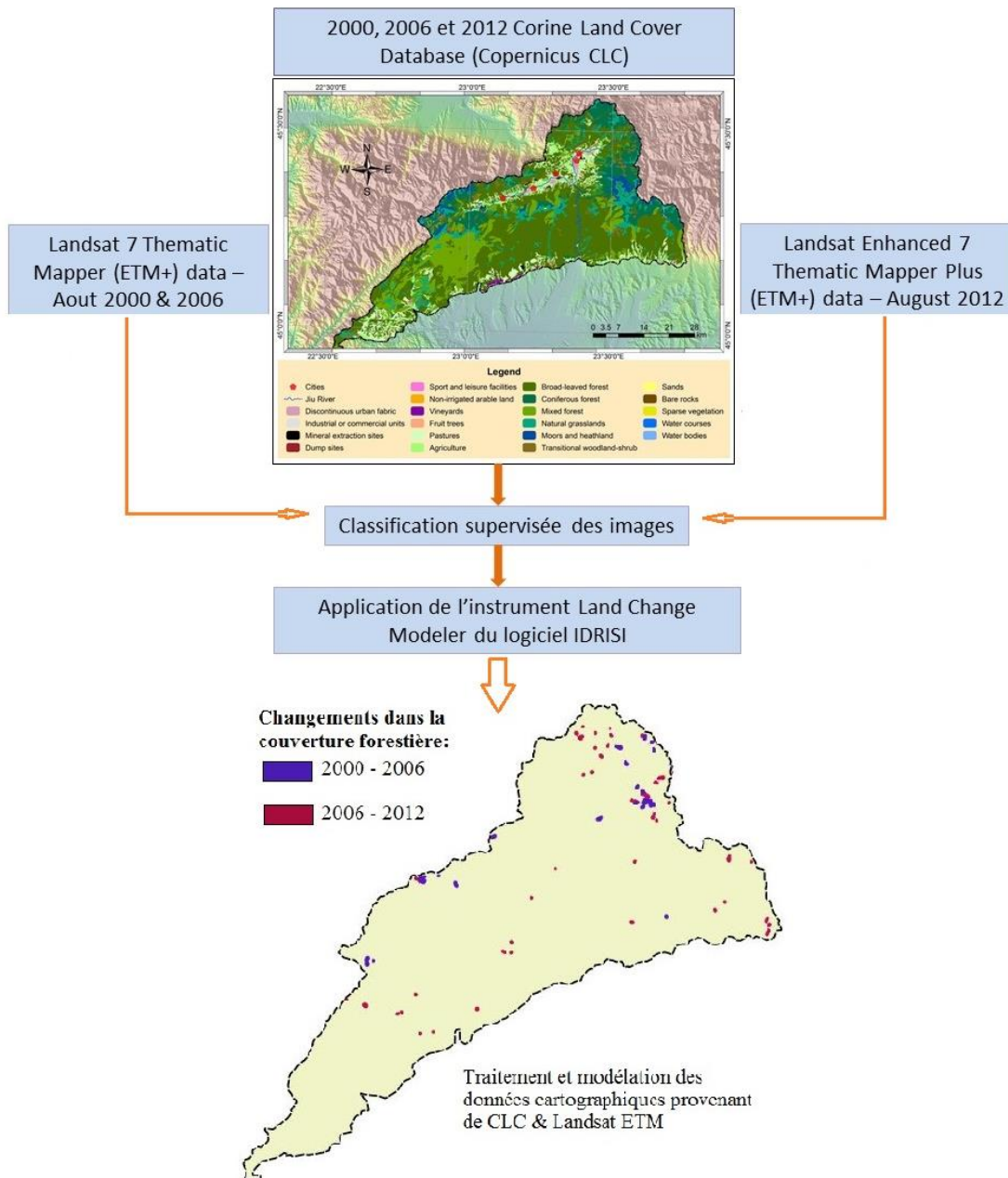
---

<sup>13</sup> NDWI (Normalized Difference Water Index) est un indice basé sur le traitement d'images par satellite, améliorant la connaissance sur la disponibilité du volume d'eau sur l'espaces terrestres (en distinguant la disponibilité en eau des zones non végétalisées de celui des marais et des ripisylves ayant une plus grande capacité de stockage d'eau) et sur les masses d'eau elles-mêmes [[Gao, 1996](#)].



améliorations, à travers des images satellitaires Landsat avec une haute résolution de 15 mètres, obtenues avec la méthode « pan-aiguisée » (angl. « *pan-sharpened* ») avec une bande panchromatique.

Pour améliorer l'analyse sur l'usage et la couverture des terrains, un set de 6 images Landsat pour les étés de 2000 et 2006 (données Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)) a été utilisé dans la classification supervisée, en dehors des données Corine Land Cover, pour les mêmes années de référence (2000, 2006 et 2012). Les images satellitaires correspondent aux passages orbitaux du mois d'août, considéré comme le meilleur compromis entre la période de feuillage maximum et la période de basses eaux de la fin d'été. Afin de détecter avec précision les changements dans les forêts entre les années de référence, 2000 et 2012, nous avons utilisé le logiciel Land Change Modeler (LCM), dans le logiciel IDRISI Taiga (**Figure III.49**).



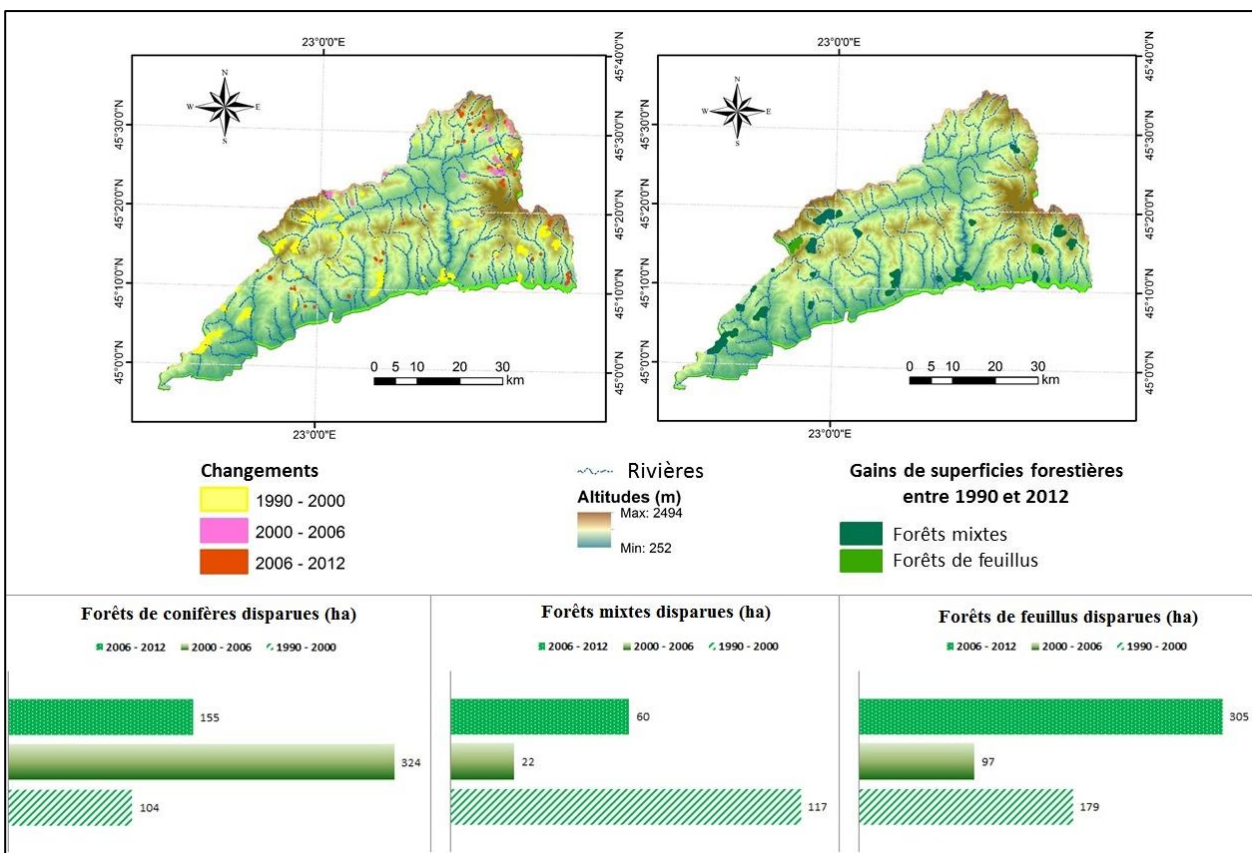
**Figure III.49.** Le flux de travail pour la classification des changements dans les superficies forestières du bassin supérieur de la rivière Jiu dans la période 2000 – 2012

Par la suite, on a procédé à l'identification de tout changement dans la couverture forestière, selon les codes assignés pour chaque catégorie d'usage et de couverture. Pour les deux sous périodes (2000-2006 et 2006-2012), nous avons calculé la surface (en hectares) et le pourcentage des changements dans la couverture forestière par rapport à la surface totale (%).

### 3.9.3.4. Relations entre les changements dans la couverture forestière (2000 – 2012) et la dynamique hydro-sédimentaire

Dans la zone d'étude, presque tous les changements identifiés ont été caractérisés par la conversion des forêts de feuillus, de conifères et mixtes dans des zones avec des arbustes de transition. Par conséquent, seulement sur 5,7 ha les changements de la couverture du sol n'ont pas visé la perte de forêts ou leur fragmentation (l'apparition des arbustes de transition sur des anciens pâturages alpins dans le sous-bassin de Sadu).

La **Figure III.50** met en évidence les changements intervenus au cours de chacune des trois sous-périodes d'analyse (1990 - 2000, 2000 - 2006, 2006 - 2012).



**Figure III.50.** Représentation des modifications de la végétation forestière (1990-2012) survenant dans la partie supérieure du bassin de la rivière Jiu (d'après Moroşanu, 2017)

Une première remarque est que la surface des forêts perdus est moins importante dans le second intervalle d'analyse (2006 – 2012) pour tous les sous-bassins, sauf dans le cas du bassin correspondant à la station hydrométrique de Teleşti. Entre 2000 et 2006, des superficies importantes des bassins versant amont des stations hydrométriques de Câmpu lui Neag, Sadu et Teleşti ont subi des pertes forestières.

Par la présente étude, la relation entre les changements dans la couverture forestière et la dynamique hydro-sédimentaire a été explorée. D'un point de vue administratif, les défauts identifiés concernent l'absence d'une gestion commune eau - forêts. Dans le contexte plus général des normes nationales et européennes, les restrictions dans l'exploitation du bois imposées après 2000, le ralentissement des activités minières et le nombre de plus en plus important d'aménagements hydrotechniques au long du Jiu semblent représenter des facteurs contrebalançant l'équilibre entre l'eau, la genèse des sédiments et les forêts dans la zone d'étude.

D'une perspective méthodologique, les analyses statistiques et cartographiques ont étendu la connaissance portant sur la connexion entre les changements dans la couverture forestière et ses effets sur la dynamique hydro-sédimentaire.

### **3.9.4. L'extraction des granulats des lits des rivières**

Étant une activité anthropique très mal réglementée, l'exploitation des agrégats du lit des cours d'eau passe souvent à côté de la loi, sans que le nombre de gravières et le volume de sable et de gravier excavés soient enregistré dans des évidences claires. Au niveau mondial, le coût de l'exploitation du substrat sédimentaire des lits de rivières a été observé et étudié il y a plusieurs décennies, mais il n'y a pas de consensus aujourd'hui sur les limites de ces exploitations et les effets concrets sur la dynamique hydro-sédimentaire. Au niveau des années '80, [Holdgate et collab. \(1982\)](#) ont attiré l'attention que chaque année, l'exploitation minière (à la fois des rivières et des versants), mobilise environ 3000 milliards de tonnes de matériaux en tant que sources de sédiments.

En Roumanie, les exploitations de gravier ont culminé pendant la période communiste (1970 – 1990), avec le début des constructions des grands ensembles architecturaux qui avaient besoin de sable comme matière première pour le ciment [[Obreja, 2012](#)]. Elles ont diminué après 1989 et ont pris de l'importance avec la reprise économique en 2000.

L'extraction des granulats des lits des rivières<sup>14</sup> continue à être une affaire rentable, qui impacte, malheureusement, les rivières. L'ouverture d'une gravière devrait se faire sur la base d'un accord environnemental et d'un rapport décrivant l'emplacement, les caractéristiques physico-géographiques de la section de rivière concernée, le régime des flux liquides et solides, les éléments naturels ou sociétaux susceptibles de présenter un risque, ainsi que le volume des agrégats estimés à être extraits. En réalité, très peu de gravières fonctionnent légalement et même s'ils ont été établis sur la base d'un rapport d'activité légalement préparé, la plupart du temps, ils s'étendent à des zones adjacentes non mentionnées initialement. Dans le bassin de la rivière Jiu, il existe très peu de gravières déclarés légalement, pour lesquels nous avons réussi à trouver des mémoires de mise en fonctionnement (pas plus de 10 projets). En fait, comme on peut le voir au chapitre §4.2, la rivière Jiu et ses affluents sont poussés par des dizaines, voire des centaines de gravières qui fonctionnent plus ou moins légalement.

---

<sup>14</sup> Selon Le Rapport sur l'Impact sur l'Environnement des Gravières, le volume total extrait sur les rivières in Roumanie dans l'année du maximum (1988) a été estimé à environ 1,7 mil. m<sup>3</sup>

Les conséquences de l'existence de ballast sur la dynamique hydro-sédimentaire sont évidentes :

- l'extraction du réseau hydrographique d'importants volumes de sédiments qui ne peuvent plus être transférés en aval ;

- l'occupation des surfaces dans le lit majeur des rivières par les équipements d'extractions des granulats et la découverte des terrains (dont une partie couverte par la végétation), pour l'extraction du substrat sableux ;

- la transformation (modification de la géométrie) des petites rivières et donc la modification des conditions hydrauliques de transport de l'eau et des sédiments ;

- compte tenu des restrictions d'utilisation et des conditions de qualité, la zone d'exploitation des sables et graviers est réduite presque uniquement aux secteurs moyen et inférieur des lits mineurs [Obreja, 2012]. Ces secteurs sont des zones importantes de transfert et d'accumulation de sédiments fins qui, en les retirant du système, ne garantiront plus la protection des rives et du fond des rivières contre l'érosion.

## *Synthèse du chapitre*

Dans ce chapitre, on a présenté les particularités géographiques du bassin de la rivière Jiu. Du point de vue géologique, ce bassin est caractérisé par une complexité et variété lithologique, reflétées pas la diversité géomorphologique. Du nord vers le sud, trois grandes unités géomorphologiques s'étalent en amphithéâtre : 1) les montagnes appartenant aux Carpates Méridionales (25% de la surface totale du bassin); 2) les collines subcarpatiques et de piémont (67%) et 3) la plaine (8%). En fonction de cette zonalité géomorphologique, le bassin versant de Jiu peut être divisé trois ensembles morphologiques :

I. Le secteur supérieur, qui correspond à la zone montagneuse (carpatique), Dans ce secteur, la Jiu prend ses sources par ses deux affluents, la Jiu de l'Est et la Jiu de l'Ouest, qui drainent la dépression de Petroșani. Le bassin supérieur de la Jiu correspond du point de vue strictement hydrologique au territoire situé en amont de la sortie de la rivière du secteur des gorges ;

II. Le secteur moyen s'étale entre les Carpates et la plaine (jusqu'au sud de la ville de Craiova), au niveau des collines des Subcarpates et du Piémont Gétique ;

III. Le secteur inférieur, correspondant à la plaine, est réduit à une bande de quelques kilomètres de largeur entre la ville de Craiova et la confluence avec le Danube.

A part la lithologie et la morphologie, un rôle majeur dans la dynamique hydro-sédimentaire dans le bassin versant de la rivière Jiu a le climat, dont les particularités sont liées à la position géographique et à l'altitude qui imposent des variations spatiales importantes.

Les sols et leur couverture / utilisation influencent également les processus d'écoulement de l'eau et l'érosion et, par conséquent, les flux liquides et solides.

Les activités anthropiques ont un impact majeur sur la dynamique hydro-sédimentaire dans le bassin étudié. Nous avons fait référence particulièrement à la présence des mines de charbon (lignite dans le bassin moyen de Motru-Rovinari et houille dans le bassin supérieur – la dépression de Petroșani), aux aménagements

hydrotechniques (barrages, réservoirs, dérivations) et l'extraction des granulats des lits des rivières. Les exploitations de charbon dans des zones clés de source des sédiments confère un caractère original à la recherche, permettant d'étudier les transferts de matière dans le bassin versant de la rivière Jiu. Il nous reste à analyser la pertinence de certaines analyses des domaines connexes (spectrocolorimétrie, modélisation spatiale de la connectivité sédimentaire, géochimie et pétrologie organique), afin d'établir dans quelle mesure nous pouvons utiliser le charbon comme témoin de la dynamique hydro-sédimentaire.



## Chapitre 4.

# Analyses des flux sédimentaires à l'échelle systémique du bassin de la rivière Jiu : des versants vers l'aval

<b>4.1. Méthodologie pour la variation de la teneur totale en matières dissoutes des rivières.....</b>	<b>123</b>
4.1.1. Données et méthodologie.....	124
4.1.1.1. Données de terrain.....	124
4.1.1.2. Données cartographiques.....	128
4.1.2. Résultats des approches statistiques.....	131
4.1.2.1. Analyse en Composantes Principales.....	131
4.1.2.2. Modèle de régression linéaire.....	134
4.1.3. Discussions et conclusions.....	134
Synthèse partielle 1.....	135
<b>4.2. Processus gouvernant la genèse et le transfert des sédiments à l'échelle du bassin de la Jiu.....</b>	<b>135</b>
4.2.1. Méthodologie .....	135
4.2.1.1. Conceptualisation d'une approche.....	135
4.2.1.2. Bases de données et stratégie de cartographie.....	138
4.2.2. Résultats et discussions.....	145
4.2.2.1. Les processus géomorphologiques induits par des causes naturelles.....	145
4.2.2.2. Les activités anthropiques impactant la production des sédiments .....	152
4.2.2.3. L'impact des processus géomorphologiques et des activités humaines sur l'accumulation des alluvions dans les rivières.....	156
Synthèse partielle 2.....	158
<b>4.3. Connectivité potentielle sédimentaire.....</b>	<b>158</b>
4.3.1. Considérations théoriques sur la connectivité sédimentaire.....	159
4.3.1.1. Le concept de connectivité sédimentaire.....	159
4.3.1.2. Les limites de la connectivité sédimentaire.....	161
4.3.1.3. Comment quantifier la connectivité (hydro-)sédimentaire ou le besoin des indices ?.....	162
4.3.1.4. La connectivité sédimentaire : quels enjeux ? .....	164
4.3.2. L'indice de connectivité : cadre conceptuel.....	164
4.3.2.1. Quel indice de connectivité pour analyser le transfert des matières sédimentaires ? .....	164
4.3.2.2. Données utilisées dans le calcul de l'indice de connectivité et limites de l'analyse.....	167
4.3.3. Méthodologie de l'indice de connectivité adaptée à la problématique du b.v. Jiu..	168
4.3.3.1. La construction des modèles numériques de terrain.....	168
4.3.3.2. La délimitation du réseau hydrographique.....	173
4.3.3.3. La rugosité du terrain.....	176
4.3.3.4. Les réglages finaux de la mise en route de l'indice de connectivité.....	178
4.3.4. Résultats de l'analyse de connectivité.....	179
4.3.4.1. Les zones sources de sédiments les plus connectées aux rivières.....	179
4.3.4.2. La relation entre la connectivité sédimentaire et les processus géomorphologiques.....	186
4.3.4.3. La relation entre la connectivité sédimentaire et la production sédimentaire.....	187
Synthèse partielle 3.....	192

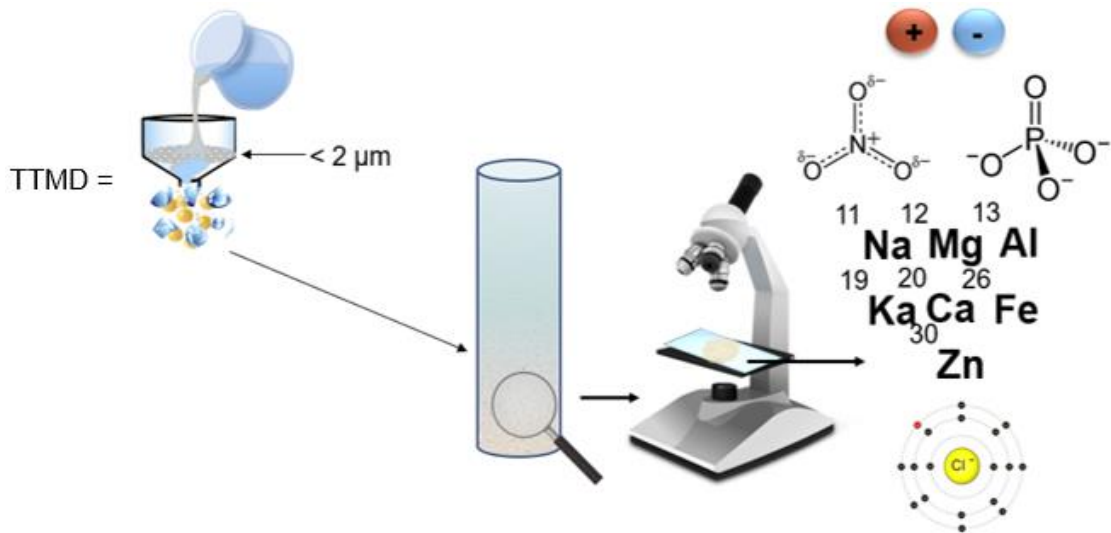
L'objectif de ce chapitre est d'analyser le rôle des différents facteurs géographiques contrôlant de la variation spatiale des flux solides en termes de sources, voies de transfert, connexion entre les sous-systèmes et dépôt. Nous allons commencer avec la teneur totale en matières dissoutes (§4.1), la composante la plus fine des flux sédimentaires, ensuite nous allons continuer avec une évaluation systémique des processus (hydro)-morphologiques qui peuvent se constituer en sources ou vecteurs de la production et du transfert de l'amont en aval des alluvions (§4.2), nous allons étudier la liaison entre les zones sources potentielles et les zones de stockage intermédiaire ou final des alluvions par modélisation du degré de connectivité hydro-sédimentaire (§4.3), pour essayer au final d'estimer le taux général de sédiments capables d'être exportés du système de la rivière Jiu et de ses affluents, à partir des variables morphométriques, pédologiques et d'utilisation des terres.

#### ***4.1. Méthodologie pour quantifier le rôle des facteurs contrôlant la variation de la teneur totale en matières dissoutes des rivières***

La teneur totale en matières dissoutes (**TTMD**, en anglais *total dissolved solids - TDS*) est un paramètre de la qualité de l'eau des rivières reflétant la teneur combinée de toutes les substances inorganiques et organiques dissoute dans un liquide sous forme de suspension moléculaire, ionisée ou micro-granulaire (sol colloïdal) [DeZuane, 1997]. Les solides doivent être suffisamment petits pour survivre à la filtration à travers un filtre à pores de 2 micromètres (taille nominale ou inférieure) [DeZuane, 1997]. La TTMD est due aux caractéristiques physiques (géologie, pédologie, usage et couverture des sols) et aux activités anthropiques spécifiques aux bassins versants (exploitation des forêts, extraction des granulats des lits des rivières, exploitation des minéraux des versants, etc.).

Du point de vue physico-chimique, la TTMD et la conductivité électrique (CE) sont étroitement liés [Iyasele et Idiata, 2015]. Ce lien est assuré par la présence des mêmes composés dans l'eau (généralement sous forme de sels), ce qui conduit à une augmentation directement proportionnelle du TTMD et de la CE et à leurs valeurs qui peuvent être obtenues les unes par rapport aux autres, le TTMD étant en moyenne deux fois plus grande que la CE [Weiner, 2008 ; Iyasele et Idiata, 2015; Moroşanu *et al.*, 2017]. Le diagramme ci-dessous (**Figure IV.1**) montre comment les substances dissoutes peuvent être obtenues et par quoi elles sont caractérisées d'un point de vue physico-chimique.

Les sels les plus communs qui pourraient apparaître dissous dans l'eau des rivières sont le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). Les solides dissous qui constituent la TTMD sont classés comme contaminants secondaires par l'Environmental Protection Agency (EPA) et la limite maximale acceptable suggérée est de 500 ppm [Bauder et Sigler, 2017].



**Figure IV.1.** La définition schématisée de la TTMD

Notre objectif est de trouver une méthode pouvant être reproduite dans des conditions environnementales similaires, afin de déterminer la contribution de différents facteurs à la variation spatiale du TDS. Dans ce sous-chapitre nous analyserons la variation spatiale de la TTMD et identifierons le rôle des principaux facteurs qui l'influence dans le bassin de la rivière Jiu, en proposant et testant une méthodologie basée sur l'analyse spatiale en milieu SIG et la modélisation statistique. Comme nous l'avons constaté dans les chapitres précédents, ce bassin présente une grande diversité des caractéristiques physiques et anthropiques pouvant se constituer dans des facteurs responsables de la qualité et la quantité des matières fines véhiculées dans les rivières.

#### 4.1.1. Données et méthodologie

L'analyse menée dans ce sous-chapitre repose sur deux catégories de données :

- 1) Données mesurées sur le terrain ;
- 2) Données cartographiques.

En ce qui concerne la méthodologie, nous avons utilisé deux types d'approches :

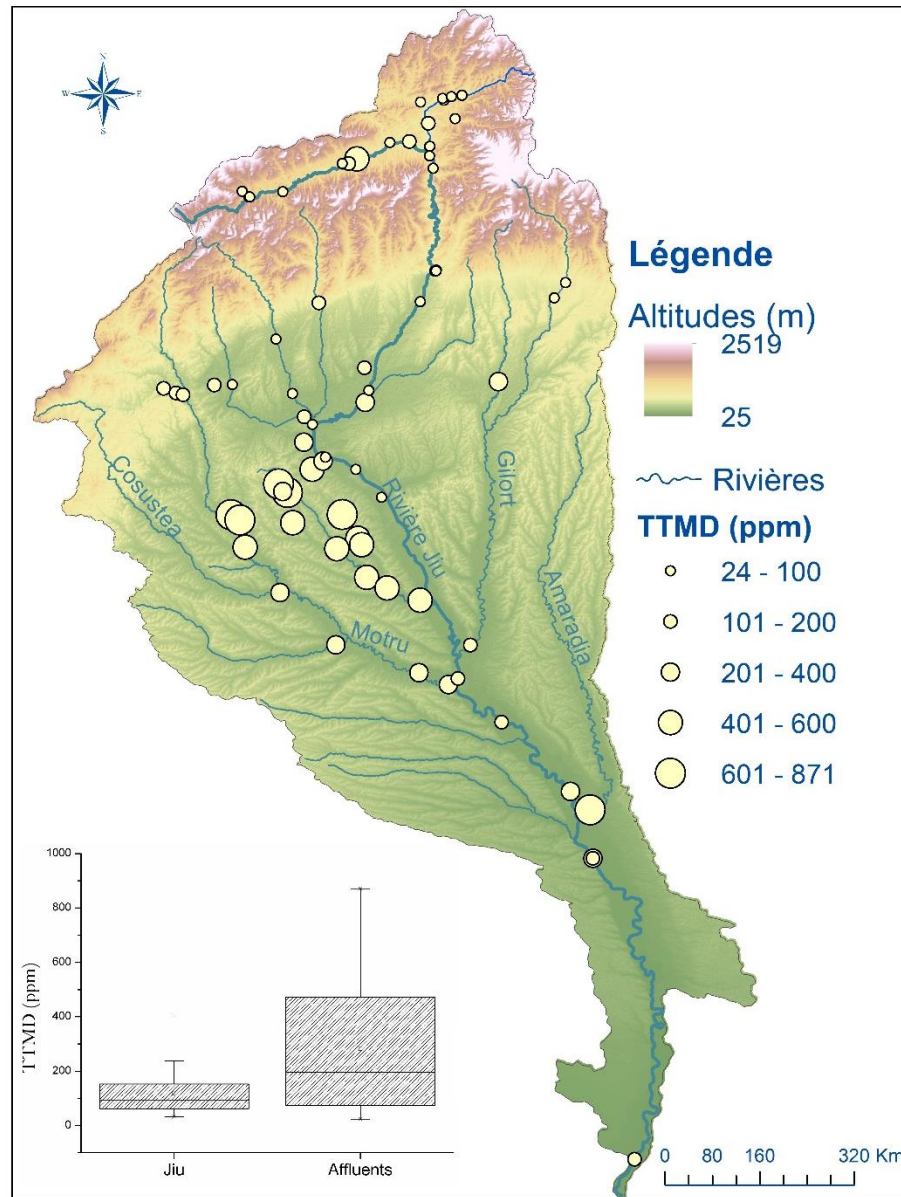
- 1) Cartographique, pour la spatialisation (en milieu SIG) des paramètres considérés dans l'analyse ;
- 2) Statistique, pour quantifier le rôle des différents facteurs contrôlant la variabilité spatiale de la TTMD à l'aide d'une analyse multivariée

##### 4.1.1.1. Données de terrain

Dans notre bassin hydrographique, nous avons réalisé des mesures de TTMD en 2016 et 2017, pendant des périodes d'étiage et de moyennes eaux. Au total, 65 mesures ont été réalisées en utilisant un testeur portable EC/TTMD/Température. Chaque mesure a été prise dans les premiers centimètres de profondeur de l'eau dans

le lit mineur des rivières, près de la berge. La température de l'eau a été relevée et des observations sur le site ont été faites pour déceler l'existence d'éventuels facteurs perturbateurs de l'état de qualité de l'eau.

Dans la **Figure IV.2** la répartition spatiale des sites de mesure en fonction des valeurs de la TTMD est présentée. La carte montre une concentration élevée des valeurs des TTMD dans le centre – ouest du bassin, une zone qui correspond généralement au sous-bassin de la rivière Jilț et au bassin d'exploitation du lignite Motru – Rovinari.



**Figure IV.2.** Le bassin versant de la rivière Jiu et les points de mesure de la TTMD en fonction de l'ordre des valeurs

Sur l'ensemble du bassin, les valeurs de la TTMD ont varié entre 31 ppm (pour la rivière Jieț, à la s.h. Jieț dans le secteur de ses gorges) et 806 ppm (sur un ruisseau se jetant dans la Jiu de l'Ouest, au point d'évacuation des eaux usées de la mine de Lupeni). Le bassin de la rivière Jilț se remarque par les plus grandes valeurs de TTMD, que nous supposons être influencées par les activités minières (extraction et traitement du

lignite) dans son secteur supérieur. Les principaux affluents du Jiu (les rivières Motru et Gilort) ne montrent pas de grandes valeurs et variations du TTMD. Ces valeurs ne dépassent pas 300 ppm dans le cas de la rivière Motru (le maximum étant enregistré en aval de la confluence avec les ruisseaux chargés de particules de charbon, drainant les flancs occidentaux du bassin minier de Motru - Rovinari) et 200 ppm dans le cas de la rivière Gilort (moins influencée par les activités anthropiques). La rivière Amaradia, sans être influencée par des activités anthropiques ponctuelles importantes (à part l'agriculture comme source diffuse de pollution), présente des valeurs assez élevées de la TTMD (500 - 600 ppm) qui relèvent probablement des particularités de nature géologique et pédologique.

Sur la rivière Jiu, les valeurs de TTMD augmentent généralement de l'amont vers l'aval, avec des pics intermédiaires, probablement générés par des sources locales de pollution, provenant d'eaux usées et chargés de matières en suspension. Ainsi, les valeurs de TTMD augmentent de 45 ppm à Câmpu lui Neag (secteur supérieur de la Jiu de l'Ouest) à 70 - 80 ppm à la sortie du secteur montagneux (avec des pics de 150 - 200 ppm) près des unités d'exploitation et de lavage de charbon, situé sur la Jiu de l'Ouest (sur le territoire des villes minières de Vulcan, Lupeni, Aninoasa). Dans le secteur collinaire et de plaine, les valeurs de la TTMD sur la rivière Jiu augmentent de 80 à 100 ppm dans le secteur Bumbesti - Rovinari, à 200 à 300 ppm dans le secteur entre Rovinari et Craiova et légèrement au-dessus de 300 ppm à l'ouest de Craiova (le secteur entre Işalnița et Podari, soumis aux influences anthropiques de l'agglomération urbaine). En aval, vers l'embouchure avec le Danube, les valeurs de la TTMD se situent entre 200 et 400 ppm, sans variations significatives.

Avant de passer à l'étape de l'analyse statistiques, il a fallu nous assurer que les points de mesure ont été bien choisis en termes de représentativité et non-répétabilité de l'information. Ce type d'approche est nécessaire pour vérifier si les points de mesure ne présentent pas une autocorrélation, mais qu'au contraire, ils sont bien dispersés et suivent une distribution spatiale aléatoire. Pour ce faire, on a utilisé l'indice global de Moran ( $I$ ), qui est un des plus puissants et complexes teste de vérification de l'autocorrélation spatiale.

Nous avons reporté sur une cartographie SIG les coordonnées spatiales des points de mesure. L'hypothèse nulle a été que les données sont indépendantes et qu'aucune autocorrélation spatiale n'existe.

Si un cluster spatial est présent, cela signifie que plus les entités sont proches (dans notre cas, les points de mesure des données), plus elles auront de valeurs similaires.

Une analyse visuelle simple de ces données dans notre zone d'étude tend à suggérer l'existence de certains groupes/ groupages, par exemple dans la partie centre-ouest du bassin de la rivière Jiu, plus précisément dans le sous-bassin de Jilț, comme on vient de l'affirmer tout à l'heure. A priori, on constate qu'il y a davantage de points de mesure dans cette zone, car nous étions particulièrement intéressés par la cartographie de la variation spatiale des valeurs de la TTMD pour la rivière Jilț et ses affluents, situées dans une zone minière. Donc ce choix délibéré de mesurer davantage de sites sur les rivières proches peut nous placer dans l'hypothèse alternative du test (les points sont auto-corrélés). On s'attend également à ce que les valeurs de la TTMD les plus élevées se concentrent davantage dans ce sous-bassin, car nous avons dès le début tendance à accorder plus d'importance aux activités d'extraction du charbon, qui influencent fortement la qualité de l'eau des



rivières. La même remarque pour la concentration de points dans la partie nord supérieure du bassin de la rivière Jiu, dans Dépression de Petroșani, où les activités d'extraction et de traitement du charbon bitumineux sont soupçonnées de jouer un rôle crucial dans l'augmentation de la conductivité et des valeurs de TTMD. Les autres valeurs élevées de la TTMD sont assez bien réparties à notre avis, cela pourrait donc être dû à l'influence de certains des facteurs que nous allons prendre en compte dans l'analyse statistique à plusieurs variables.

L'indice I de Moran issue de l'équation [Moran, 1950] :

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

où N = le nombre d'unités spatiales indexées par i et j; x = la variable d'intérêt;  $\bar{x}$  = la moyenne de x;  $w_{ij}$  = une matrice de poids spatiaux avec des zéros sur la diagonale; W = la somme de toutes les valeurs de  $w_{ij}$ .

Le test « I » est compris entre -1 et 1, où 0 indique un processus spatial aléatoire. Les valeurs allant de -1 à 1 indiquent une classification uniforme et une corrélation parfaite entre les observations, et -1 est représentatif de la diffusion / répulsion spatiale. Dans notre cas, la valeur attendue de I de Moran sous l'hypothèse nulle d'absence de corrélation spatiale est entre 0 et 0,5. Pour les échantillons de grande taille (c.-à-d. lorsque N s'approche de l'infini), la valeur attendue se rapproche de toute façon de zéro, mais dans notre cas, le nombre de point est assez réduit, donc on s'attend que le teste indique une valeur de I supérieure à 0, même s'il n'y a pas d'autocorrélation.

Les paramètres du test de Moran sont définis suivant deux approches : a) la méthode de la distance inverse pour évaluer la manière dont les relations spatiales sont définies ou modélisées, où les entités proches auront un impact plus important sur les entités cibles que les entités éloignées ; b) la méthode de la distance euclidienne en tant que distance en ligne droite entre deux points. Les résultats du test I de Moran sont reportés dans le **Tableau VI.1**.

**Tableau VI.1.** Les résultats du test d'autocorrélation de Moran pour les valeurs de TTMD mesurés dans le bassin de la rivière Jiu

Méthodes		Index I de Moran	
Concept	Distance Inverse	Attendu	-0,014
Distance	Euclidienne	Résultat	0,45
Valeur p	0,05	Score Z	1,93

Nous avons obtenu pour l'indice de Moran la valeur de 0,45 qui indique un certain degré d'autocorrélation, compréhensible dans notre situation de choix délibéré de plusieurs points de mesure dans les zones clé influencées par les activités d'extraction du charbon. On se situe au-dessous de 0,5 – le seuil maximum qu'on a considéré dans le début de l'analyse. En sachant que le degré d'autocorrélation entre les points de mesure n'est pas aussi élevé pour affecter les résultats, on passe à la deuxième partie de l'analyse, basée sur deux méthodes statistiques. Pour quantifier le rôle des différents facteurs géographiques dans la variabilité spatiale de la TTMD, nous avons mis en place l'analyse des *composantes principales (ACP)* et la *régression multiple*. Les résultats sont présentés dans la suite.

#### 4.1.1.2. Données cartographiques

Afin d'évaluer le rôle des facteurs contrôlant la variation spatiale de la TTMD, nous avons considéré plusieurs caractéristiques géographiques des bassins correspondant aux points de mesure de la TTMD. Nous avons choisi les facteurs les plus pertinents mentionnés dans différents ouvrages publiés sur le sujet des matières dissoutes et leur possible origine [Weiner, 2008 ; Braul *et al.*, 2011; Niekerk *et al.*, 2014 ; Moroşanu *et al.*, 2019]. Il est notoire ici de mentionner que l'augmentation des TTMD est dans beaucoup des cas associés avec la pollution des rivières et aquifères, mais ce n'est pas toujours le cas. Les activités anthropiques (surtout l'industrie chimique et l'agriculture à la base des Pesticides) sont le plus souvent responsables de ce phénomène, mais il faut admettre aussi l'existence des rivières non soumises à l'influence humaine qui présentent toujours des valeurs assez élevées de la TTMD. Il existe très peu d'études sur la corrélation directe entre les caractéristiques naturelle de la région d'où ces rivières reçoivent les affluents, mais il apparait de manière générale que les roches carbonatées et les faciès argileux/marneux sont plus caractéristiques à ces rivières à TTMD élevée. C'est pour cette raison que dans la quantification du rôle des facteurs géographiques, nous avons essayé d'analyser autant les influences anthropiques que l'extension spatiale des substrats géologiques et pédologiques (de faciès marneux, argileux et carbonéux).

Les caractéristiques des bassins en amont de chaque site/point de mesure ont été établies en tenant compte des recommandations des études portant sur le rôle des facteurs naturels et anthropiques dans la variabilité de la TTMD dans les rivières [Braul *et al.*, 2011; Niekerk *et al.*, 2014 ; Iyasele et Idiata, 2015]. Les données cartographiques utilisées pour la spatialisation des caractéristiques géographiques ont été:

- *La carte topographique* (1:25000)<sup>15</sup>, sur la base de laquelle les bassins hydrographiques de chaque point de mesure des DTMD ont été délimités ;

- *La carte géologique* (1:200,000)<sup>16</sup> – pour spatialiser la répartition des formations lithologiques influençant le potentiel d'érosion et la charge électrique des différents ions qui sont libérés des roches. En général on considère que trois types de roches sont les responsables principales de l'émission des particules dissoutes présentes dans les rivières : les carbonates, les argiles et les marnes.

- *La carte des sols* (1:200,000)<sup>17</sup> – qui permet d'identifier et spatialiser les textures qui peuvent générer l'augmentation de la TTMD ; la texture argileuse et ses dérivées sont visées ;

- *La carte de la couverture/ utilisation e du sol* (extraite de la base de données Corine Land Cover 2012) utilisée pour la spatialisation des aires avec des activités anthropiques, susceptibles d'influencer la TTMD ; nous avons retenu les catégories suivantes : les zones minières et industrielles, les terrains irrigués, les zones urbaines et les sources diffuses de pollution.

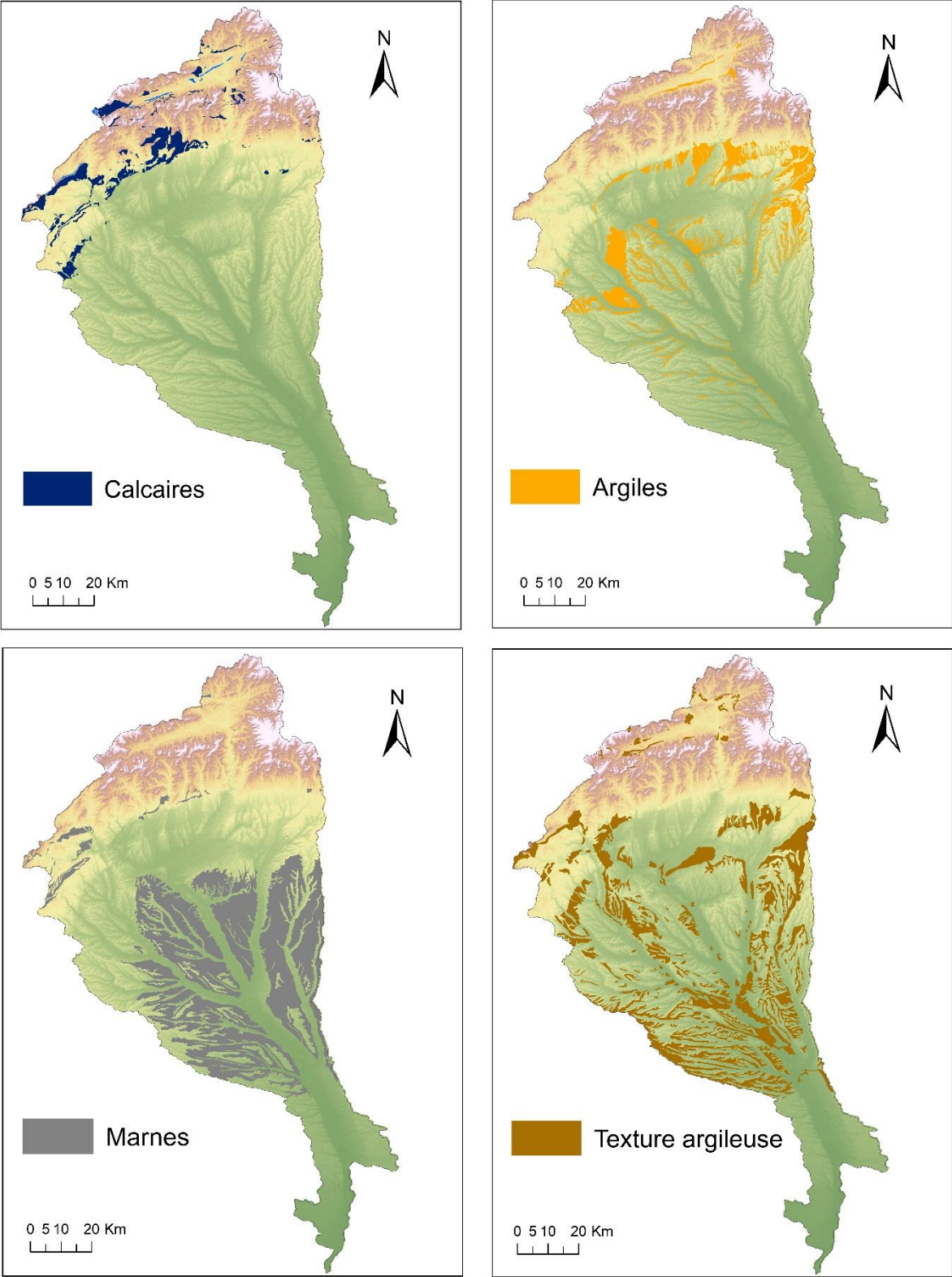
---

<sup>15</sup> Sources : la Direction Topographique Roumaine (1982)

<sup>16</sup> Réalisée dans les années '60 par l'Institut de Géologie de la Roumanie

<sup>17</sup> Auteurs - Florea *et al.*, 1964; Éditeurs : l'Institut National de Géologie (IG); l'Institut d'Etudes et de Recherches Pédologiques (ISCP).

En interrogeant les tableaux d'attributs de chaque base de données obtenue par spatialisation en milieu SIG (lithologie, sols et leur occupation), nous avons obtenu l'extension spatiale des faciès des calcaires, des argiles, des marnes et des sols avec une texture argileuse (*Figure IV.3*).



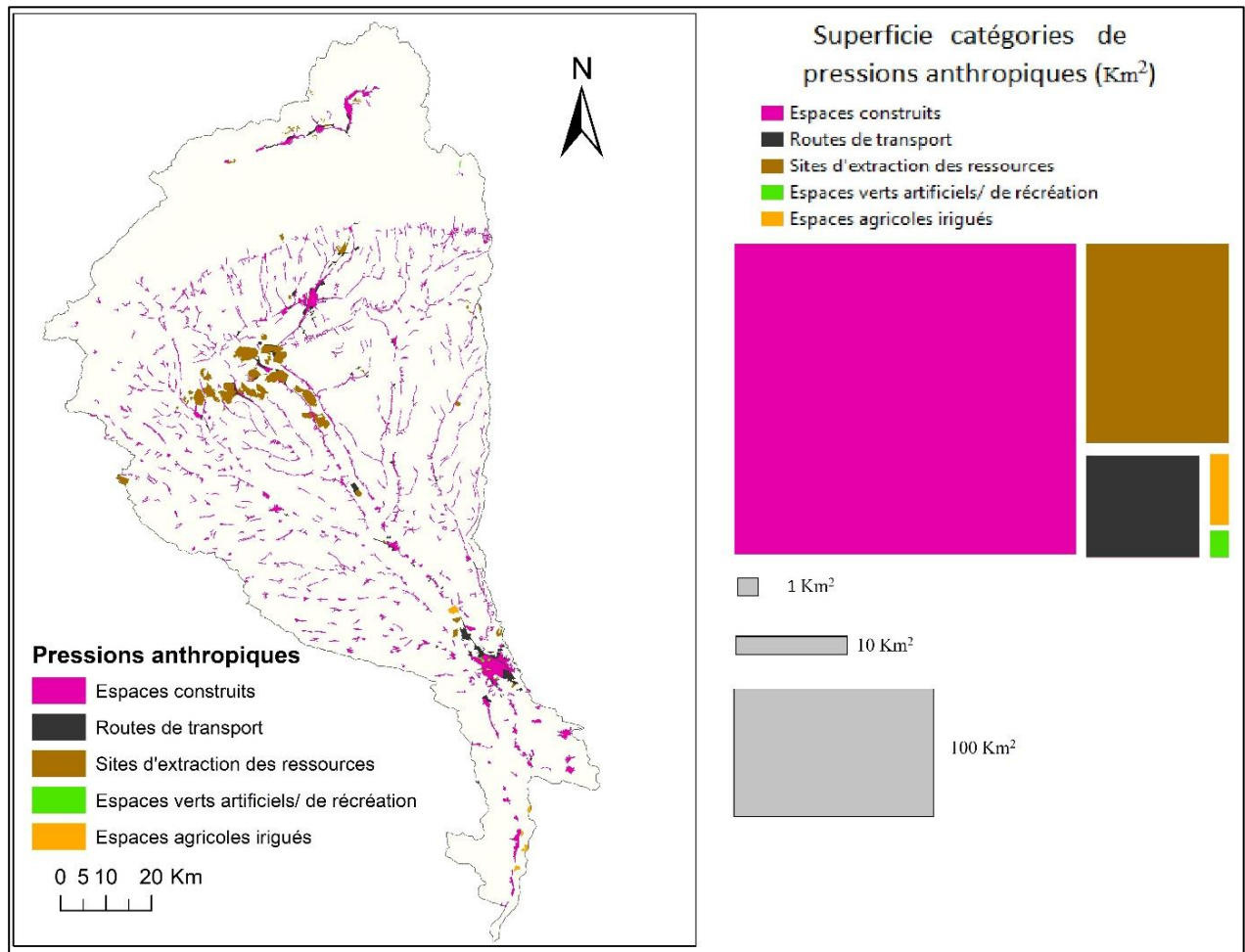
**Figure IV.3.** Cartes de la spatialisation des variables prédictives géologiques et pédologiques utilisées dans l'analyse multivariée dans le b.v. de la rivière Jiu

Des informations plus détaillées sur les formations géologiques liées aux carbonates, aux argiles et aux marnes, ou pour les catégories de textures du sol sensibles à l'érosion, sont présentés dans le chapitre §3.3 (sur les caractéristiques lithologiques) et §3.8 (sur l'utilisation / la couverture du sol).

Pour chaque sous-bassin qui correspond à un site d'échantillonnage, nous avons défini l'influence de plusieurs caractéristiques sur la base de la lithologie (marnes, calcaires, roches vulnérables à l'érosion), des sols (texture argileuse) et de la couverture/usage des terres, qui influent la solubilité et le contenu solide. L'évaluation du rôle des facteurs considérés a été réalisée en milieu SIG à travers un jeu d'analyses statistiques spatiales, sur la base du pourcentage de couverture du bassin pour chaque déterminant. Afin d'identifier les contributions de chaque caractéristique retenue du bassin dans la variabilité de la TTMD, nous avons appliqué l'analyse des composantes principales (ACP, *en anglais*, Principal Components Analysis - PCA).

Les classes d'utilisation du terrain qu'on a considérées potentiellement responsables de la variation spatiale de la TTMD ont été : tout espace construit/ urbain (car les déchets urbains peuvent fournir des particules émises par les matériaux de constructions qui peuvent arriver dans les rivières par les réseaux de drainage urbain) ; les voies de transport qui peuvent être responsables de la pollution par dissolution ; les sites d'extraction des ressources minérales qui peuvent constituer des sources importantes de matières solides de toutes les dimensions (dissoutes, en suspension, ou même des gros granulats arrivés dans les rivières); les espaces verts ou de récréation dans les milieux urbains qui peuvent aussi se constituer dans des sources de pollution des rivières; les espaces agricoles irrigués (nous n'avons considéré que ce type de terrain agricole, en raison de la contamination potentielle des eaux des rivières liée aux cultures irriguées, par le biais de la nappe phréatique et les rivières). On observe dans la **Figure VI.4** la dominance des sites d'extraction, représentés surtout par les carrières de charbon, mais aussi par les tas de stériles.

Dans la première partie, pour chaque facteur considéré dans l'analyse nous avons déterminé le pourcentage des superficies des différents types par rapport à la superficie totale du bassin de drainage correspondant au point de mesure des TTMD. Pour la comparaison entre les sous-bassins de différentes grandeurs, nous avons standardisé les valeurs obtenues, en calculant les pourcentages de chaque classe de couverture/ utilisation du terrain ou des caractéristiques géologiques et géographiques. Nous avons établi des classes d'influence allant de 0 (l'absence d'un certain facteur dans le bassin amont d'un point de mesure) à 1 (pourcentage maximal de l'extension d'une catégorie de facteurs). Ensuite, un tableau des variables prédictives (les 5 variables de 0 à 1 pour chaque point de mesure) et déterminantes (la valeur de la TTMD) a résulté. Les variables indépendantes utilisées ont été : les marnes, les argiles, les calcaires, les roches érodables (autres que celles des catégories antérieures), les activités anthropiques (industrie minière, champs agricoles irrigués, espaces urbaines), les sols à texture argileuse.



**Figure IV.4.** Distribution spatiale des catégories de la couverture du sol considérées comme facteurs susceptibles pour la variation des TTMD dans les rivières du b.v. de la Jiu (à gauche) et situation des superficies affectées par différentes destinations de l'utilisation du terrain (à droite)

## 4.1.2. Résultats des approches statistiques

### 4.1.2.1. Analyse en Composantes Principales

Le but de cette analyse est de réduire le nombre de facteurs possibles de contrôle de la TTMD initialement considérés, afin de trouver les variables avec la plus grande influence sur la variation des matières totale dissoutes. Pour ce faire, nous avons choisi la méthode statistique de l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP recherche des facteurs communs, les composantes principales, sous forme de combinaisons linéaires des variables à l'étude et les classe en fonction de leur nature et de la relation (étroite ou non) avec la variable dépendante (dans notre cas, les valeurs de TTMD mesurées).

Dans notre analyse, nous avons considéré initialement 6 variables qui pourraient expliquer la variation de la TTMD : les sols argileux, les roches argileuses, les marnes, les roches sédimentaires érodables (autres que les roches argileuses et les marnes) et les influences anthropiques (ce classe groupe toutes les superficies occupées par des bassins miniers, terrains agricoles irrigués, zones urbaines, etc.). Etant donnée la sensibilité de l'ACP aux variations des variables initiales, les pourcentages de l'extension de chaque variable considérée pour chaque point de mesure a été standardisé à partir de la plage des variables initiales continues, afin que



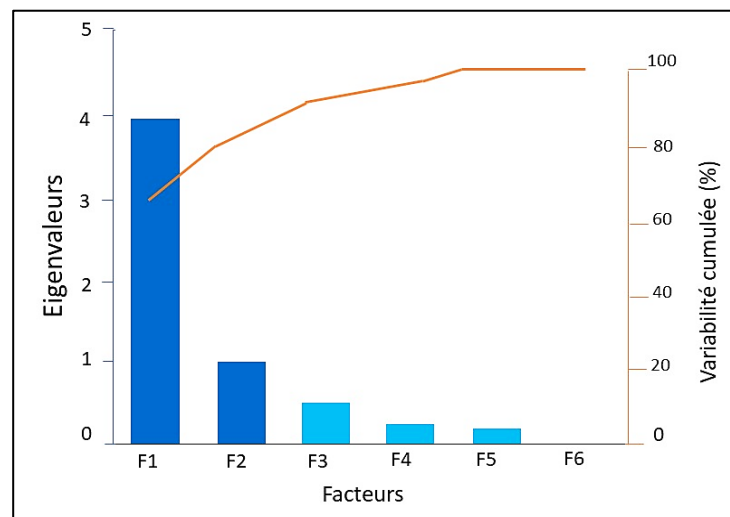
chacune d'elles contribue de manière égale à l'analyse. Pour éviter le problème du biais des grandes différences entre les plages des valeurs initiales, les variables ont été emportée sur une plage comprise entre 0 et 1, ce qui a conduit à des échelles comparables.

Le point de départ de l'interprétation des résultats de l'ACP est la matrice symétrique carrée qui consiste dans le nombre d'observations de N variables, qui seront organisées dans une matrice. Nous avons utilisé 5 variables, ce qui conduit à la matrice carrée avec la structure présentée dans le **Tableau IV.2**:

**Tableau IV.2.** Matrice de corrélation entre les variables (Pearson (n)). Les valeurs en **gras** représentent le « r » de chaque corrélation et sont  $\neq 0$ , avec un seuil de signification  $\alpha = 0.05$

	Influences anthropiques	Sols argileux	Roches argileuses	Calcaires	Marnes	Les roches érodables	TTMD
Influences anthropiques	1	0.699	0.726	-0.092	0.666	0.756	<b>0.649</b>
Sols argileux	0.699	1	0.576	-0.033	0.784	0.856	<b>0.724</b>
Roches argileuses	0.726	0.576	1	0.020	0.507	0.718	0.437
Calcaires	-0.092	-0.033	0.020	1	-0.419	-0.066	-0.376
Marnes	0.666	0.784	0.507	-0.419	1	0.915	<b>0.954</b>
Les roches érodables	0.756	0.856	0.718	-0.066	0.915	1	<b>0.867</b>
TTMD	<b>0.653</b>	<b>0.726</b>	0.440	-0.375	<b>0.955</b>	<b>0.869</b>	1

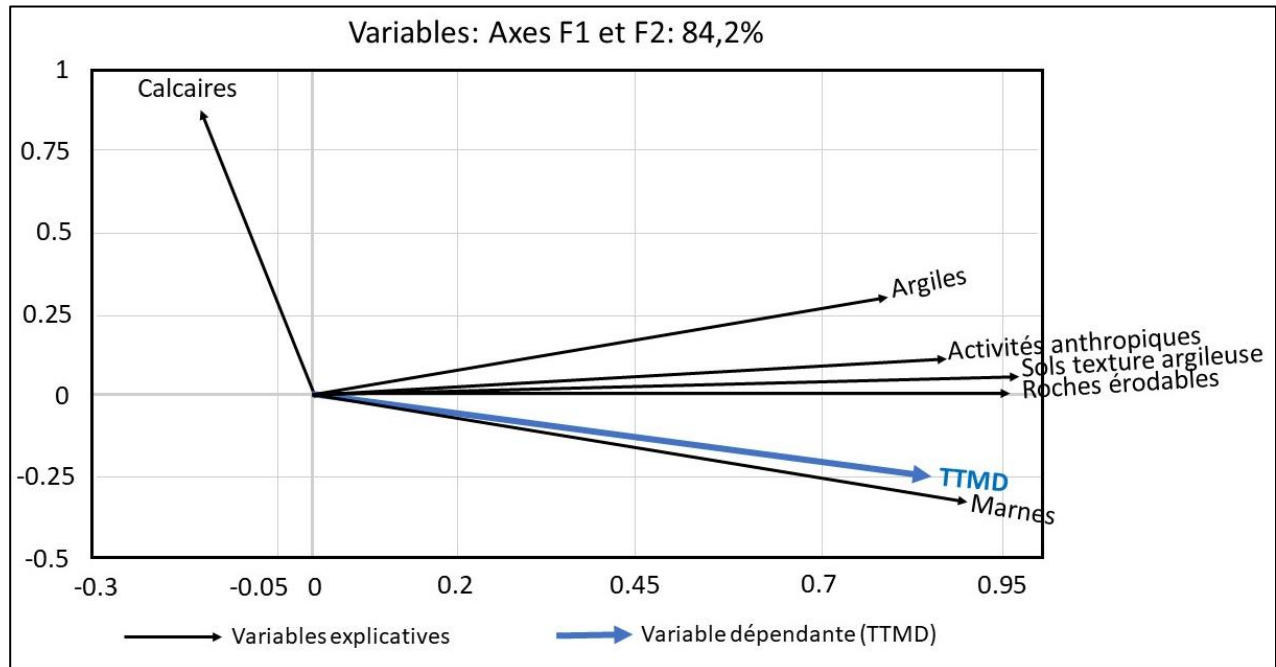
Le nombre des composantes principales (ensemble de facteurs) utilisées dans l'ACP a été établi sur la base du bi-plot (**Figure IV.5**). Les scores élevés des premières 2 composantes (colonnes orange – 87.12 %) en ce qui concerne les valeurs propres (Eigen values) et la variation (%) ont été gardés pour la PCA. La première composante principale explique autant que possible la variabilité dans les données et chaque composante suivante explique autant que possible la variabilité restante.



**Figure IV.5.** Diagramme des composantes ACP

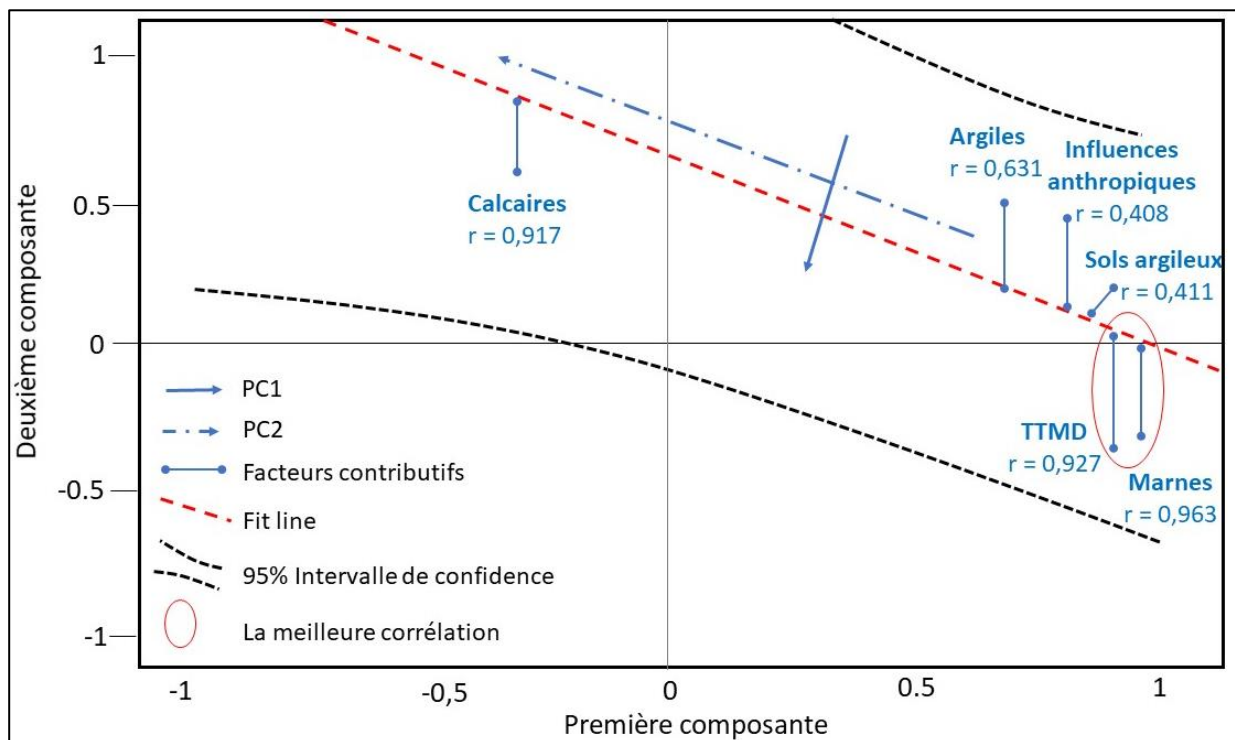
La projection spatiale des 6 variables illustre une corrélation positive significative entre marnes, argiles, roches érodables et les activités anthropiques (**Figure IV.6**). On peut voir que les marnes ont la plus grande contribution pour la première composante, ayant un caractère dominant dans la régression entre le TTMD et les 6 variables (le facteur *Durbin-Watson* était de 1,5 – 2,5, ce qui montre une corrélation statistique significative et le coefficient de détermination  $R^2 = 0.91$  pour une valeur  $p < 0,0001$ ). Presque toutes les

variables présentent au moins une corrélation  $r > 0.3$ . Les formations de “marnes” et “les roches érodables” offrent la meilleure contribution à la première composante ( $r_{\max} > 0.9$ ).



**Figure IV.6.** Valeurs tournées de la contribution de chaque variable à l’analyse des composantes principales

Dans le diagramme à deux composantes (**Figure IV.7**), les représentations simultanées de la TTMD et des résultats de l’analyse ACP permettent la création d’une carte des principaux groupes de points selon leurs caractéristiques communes qui exercent une influence sur la TTMD.



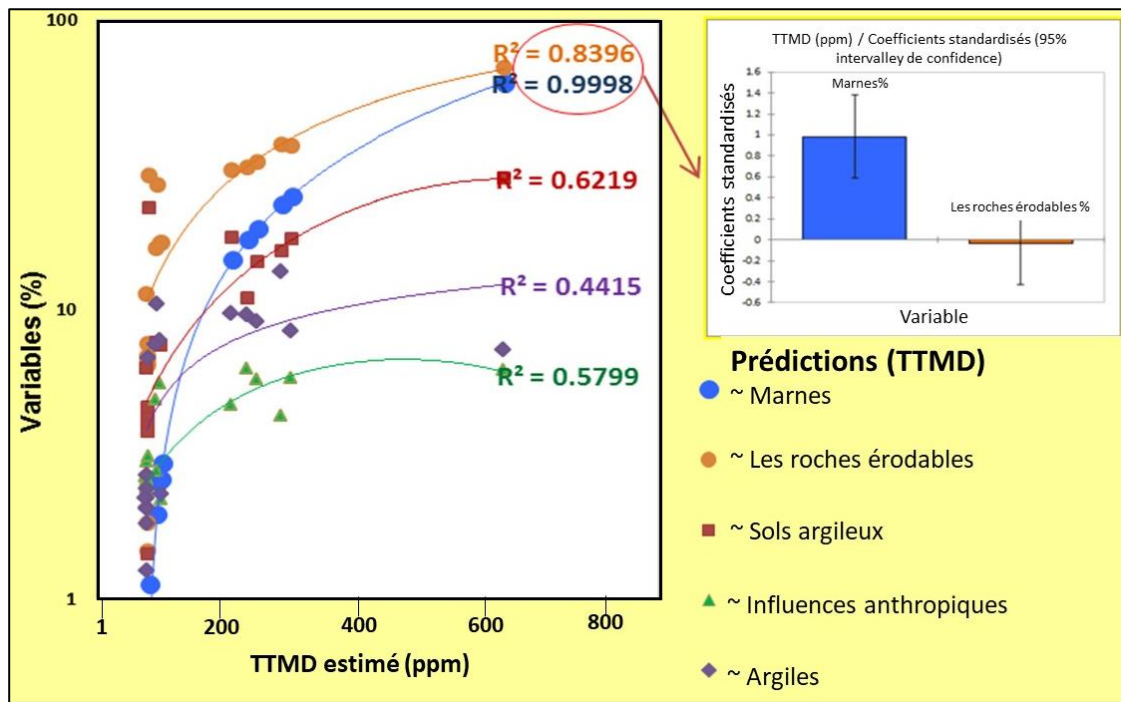
**Figure IV.7.** Répartition des caractéristiques communes des bassins versants situés en amont des points de mesure, en fonction des deux premières composantes

Suivant l'application de l'ACP, nous avons retenu 5 des 6 variables, qui sont directement corrélées avec la variation de la TTMD. La seule variable qui ne semble pas en relation avec la TTMD est constituée par les calcaires. Dans la suite, nous allons utiliser les autres 5 variables retenues, pour trouver le modèle de corrélation multiple le plus adapté à décrire les relations entre les facteurs considérés et la TTMD.

#### 4.1.2.2. Modèle de régression linéaire

La régression linéaire permet la prédiction des variables dominantes, contrôlant la variation spatiale de la TTMD. Le coefficient de détermination  $R^2$  exprimant la qualité de l'ajustement est de 0.91 (91% des TTMD peut être expliquée par les 6 variables). Notons que le TTMD est fortement lié avec la présence des marnes ( $r = 0.95$ ) et des roches érodables ( $r = 0.87$ ). De plus, les marnes et les roches érodables sont assez bien corrélées avec le TTMD ( $p < 0.0001$ ), ce qui signifie que le modèle est validé. Dans les prédictions (modèle de régression), l'erreur attendue de la TTMD est de  $\approx 42$  ppm.

Le modèle de régression peut être, ainsi, utilisé pour l'estimation des corrélations entre le TTMD prévu et les principaux facteurs qui influencent sa variation spatiale (**Figure IV.8**).



**Figure IV.8.** Corrélations post-régression (TTMD prévu et valeurs explicatrices). *Les calcaires sont absents ( $R^2$  négatif)*

#### 4.1.3. Discussions et conclusions

Le couplage des méthodes SIG à celles de l'analyse statistique (multivariée) a permis de déterminer les liens entre des facteurs géographiques et la variation des valeurs de TTMD dans le bassin versant de la rivière Jiu. Les résultats ont révélé le rôle majeur des marnes et des sols argileux dans l'augmentation de la TTMD (sur les rivières Amaradia et Gilort et sur plusieurs sections du cours moyen de la Jiu). Les zones agricoles et industrielles présentent aussi une certaine influence, indiquée par la corrélation positive entre l'existence de

telles zones et la TTDM, à un niveau de confiance de 95%. Par conséquent les variables contributrices les plus importantes dans l'accroissement de la TTMD sont le substrat géologique et la texture des sols à travers les bassins versants, suivies par les perturbations anthropiques (reflétées par les activités industrielles et agricoles).

## Synthèse partielle 1

L'emploi des techniques SIG pour chercher les possibles facteurs d'influence de l'augmentation des matières dissoutes dans les rivières du bassin de la Jiu a été décidé lorsqu'on a mesuré des valeurs de TTMD des certains affluents (surtout du bassin de la Jilț) deux fois plus élevées par rapport aux valeurs de la TTMD de la rivière Jiu. Notre hypothèse a été un témoignage de l'influence des activités d'exploitation du charbon et de la géologie subjacente.

L'importance de la méthodologie présentée ressort de l'analyse de différents facteurs générateurs pour expliquer les paramètres de la qualité de l'eau dans les rivières. En perspective il faudra valider les modèles prédictifs par des mesures supplémentaires de la TTMD dans les mêmes sites et sous les mêmes conditions hydrologiques, afin de vérifier la sensibilité de la relation entre les facteurs prédictifs et la constance de certaines valeurs élevées de la TTMD.

## 4.2. Processus gouvernant la genèse et le transfert des sédiments à l'échelle du bassin de la rivière Jiu

La recherche de l'origine des alluvions est le sujet de nombreuses études portant sur la dynamique hydro-sédimentaire dans les systèmes fluviaux. Les principales sources de sédiments fins sont liées à l'érosion des versants et aux processus gravitationnels (par exemple les glissements de terrain) qui mettent en mouvement les matériaux arrivant dans le milieu fluvial. Néanmoins, les relations complexes entre les processus générateurs de sédiments et leur transfert vers les rivières n'ont pas encore été complètement élucidées. ***Le but de ce sous-chapitre est d'analyser les processus géomorphologiques fonctionnant comme de sources de sédiments fins dans le système fluvial de la rivière Jiu, caractérisé par un flux sédimentaire élevé.*** Réputé pour ses gisements de lignite et de la houille dont l'exploitation a fortement affecté la concentration des matières en suspension et a changé la composition des sédiments fins, le bassin de la rivière Jiu se distingue par des processus géomorphologiques spécifiques, engendrés par des facteurs naturels ainsi que par des activités anthropiques. De plus, la zone d'étude recouvre une région où le taux des alluvions en suspension est élevé (plus de 10 t/ha/an), occupant la deuxième place en Roumanie en termes de débit moyen multi-annuel d'alluvions en suspension ( $165 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  à l'embouchure de la rivière Jiu).

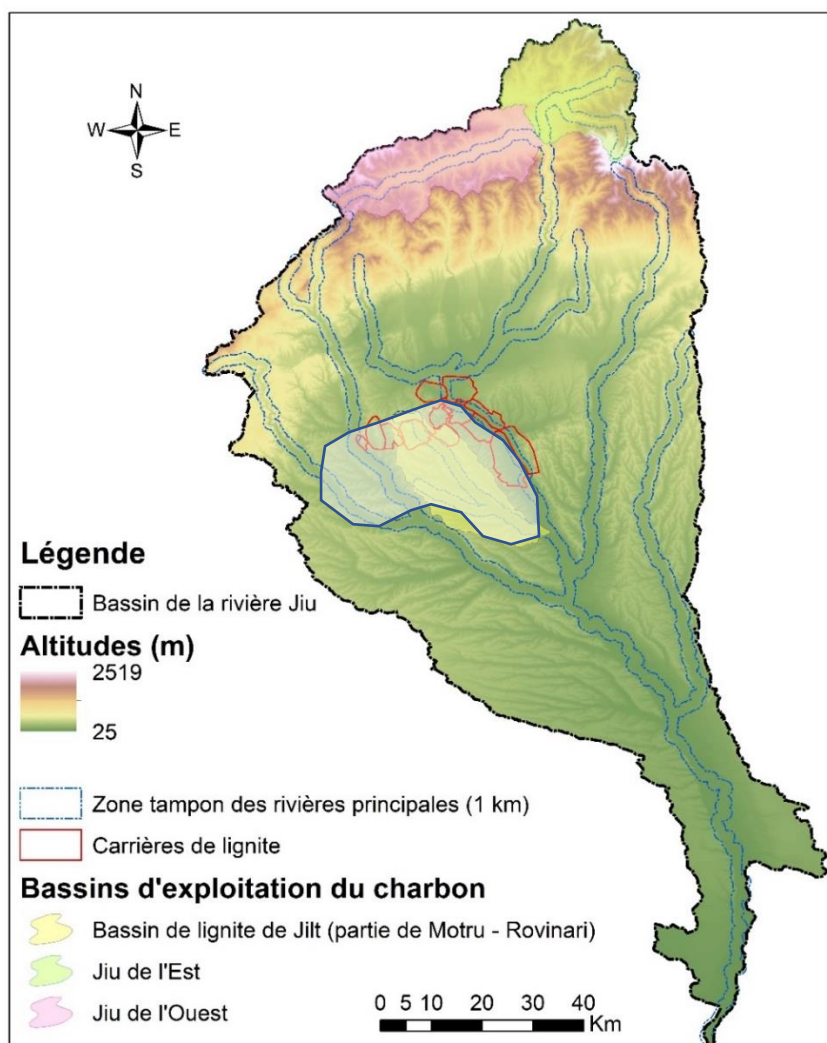
### 4.2.1. Méthodologie

#### 4.2.1.1. Conceptualisation d'une approche

Afin d'identifier les sources de sédiments fins, une cartographie détaillée des processus géomorphologiques a été réalisée sur une bande tampon de 1 km des deux côtés des rivières principales. Compte

tenu de la taille grande du bassin de la rivière Jiu (de 10080 km<sup>2</sup>), il aurait été difficile de répertorier tous les processus géomorphologiques, ce qui a imposé la nécessité de prioriser les zones les plus proches du réseau de drainage principal. Les zones tampons ont été créées le long de la rivière Jiu et de ses principaux affluents, le Jiu Est avec les affluents Lonea et Taia, Amaradia Pietroasă, Tismana, Jił et son affluent Jiłtul Mic, Motru avec ses tributaires (Coșuștea et Motru Sec), Gilort et Amaradia. Au total, la zone tampon couvre une surface de 1782 km<sup>2</sup>, à laquelle on ajoute une superficie d'environ 880 km<sup>2</sup> du bassin minier de Motru - Rovinari, couvrant en partie le bassin de la rivière Jił. Ainsi, la zone cartographiée représente environ 25% du bassin de la rivière Jiu. Dans la sélection des zones à cartographier, les critères ont été leur proximité par rapport au réseau hydrographique principal, la distribution spatiale homogène au niveau des unités de relief majeures et la localisation des objectifs anthropiques qui peuvent déterminer l'apparition ou l'accélération de certains processus géomorphologiques (le plus souvent les glissements de terres sur les pentes des tas de stériles).

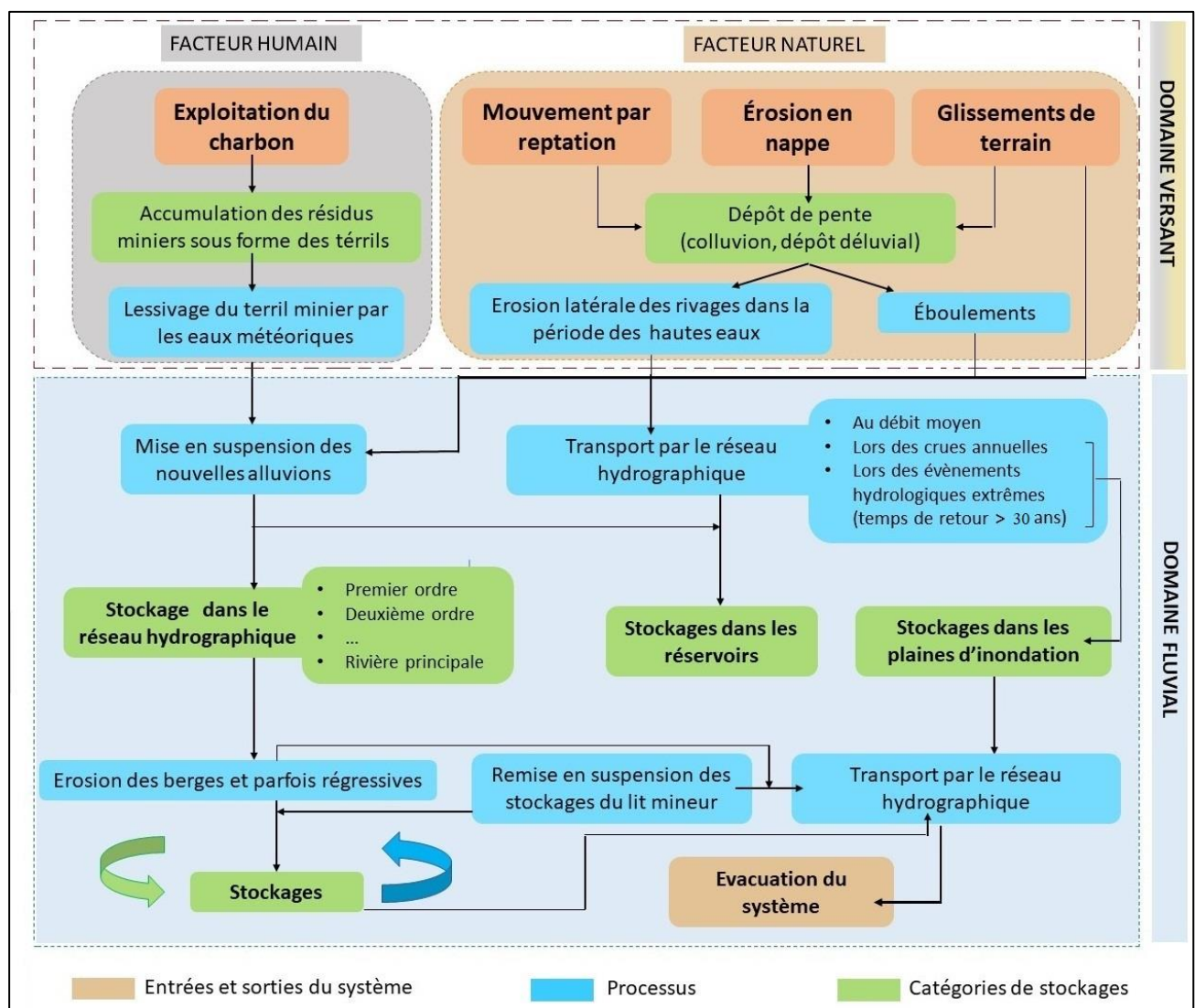
La **Figure IV.9** illustre la répartition spatiale de la bande tampon et de la zone minière considérées, ainsi que les trois sous-bassins hydrographiques où se déroulent les activités d'exploitation et de traitement du charbon (Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Jił).



**Figure IV.9.** Les zones ciblées pour la cartographie des processus géomorphologiques dans le b.v. de la rivière Jiu



Sur la même carte sont également représentés les périmètres miniers du bassin de Motru - Rovinari, selon lesquels les objectifs anthropiques spécifiques (carrières, tas de résidus miniers et processus géomorphologiques associés) ont été cartographiés. Une fois les aires d'étude délimitées, nous nous avons cherché à d'identifier les processus géomorphologiques permettant de mieux comprendre la susceptibilité des versants et des berges susceptibles de mobiliser et d'approvisionner les rivières en sédiments. Afin d'atteindre cet objectif, un schéma logique des processus hydro-géomorphologiques qui ont lieu entre la première mise en mouvement, par érosion, des sédiments et le stockage final vers l'embouchure de la rivière a été réalisé. Le schéma qu'on a proposée (**Figure IV.10**) s'inspire de différents concepts de la littérature [Reid et Dunne, 1996; Dumitriu, 2007]. Elle a été adaptée pour intégrer aussi les facteurs naturels spécifiques aux bassins hydrographiques d'une complexité similaire à celle du bassin de la Jiu, que les activités anthropiques (exploitation du charbon, aménagements hydrotechniques).



**Figure IV.10.** Schéma conceptuel du budget d'alluvions ajusté à la problématique des sources de sédiments fins dans le bassin de la rivière Jiu (adapté après Reid et Dunne, 1996 et Dumitriu, 2007)

L'ensemble des processus qui se produisent entre les moments (ou les points) d'entrée et de sortie de la matière sédimentaire a été représenté dans une logique spatiale, sur les deux domaines fondamentaux du système hydro-sédimentaire : celui *des versants* (ou *amont*, qui coïncide généralement avec les zones sources des sédiments) et le domaine *fluvial* (ou *aval*, où la plupart des sédiments transitent et se déposent pour former des stockages). Entre ces deux domaines il existe bien entendu des liaisons étroites, généralement unilatérales (des pentes vers les rivières et non l'inverse), ainsi qu'une zone de transition qui correspond aux terrasses ou aux plaines inondables. Enfin, dans le cadre du domaine des versants, il y a les deux catégories de facteurs, anthropiques et naturels, avec leurs entrées, leurs sorties, leurs processus et flux spécifiques.

#### 4.2.1.2. Bases de données et stratégie de cartographie

Pour la base de données hydrographiques, nous avons tenu compte des échelles les plus appropriées pour identifier les processus géomorphologiques, ainsi que de la disponibilité des documents cartographiques. Le **Tableau IV.3** répertorie les bases de données cartographiques, les échelles d'analyse et les éléments cartographiés. Bien que les bases de données cartographiques reflètent les réalités du terrain de différentes années, nous ne pouvons pas attribuer à notre étude une dimension multi-temporelle, car nous n'avons pas l'intention de cartographier les mêmes processus géomorphologiques à différentes périodes pour mettre en évidence leur évolution.

**Tableau IV.3.** Documents cartographiques utilisés pour identifier les processus géomorphologiques

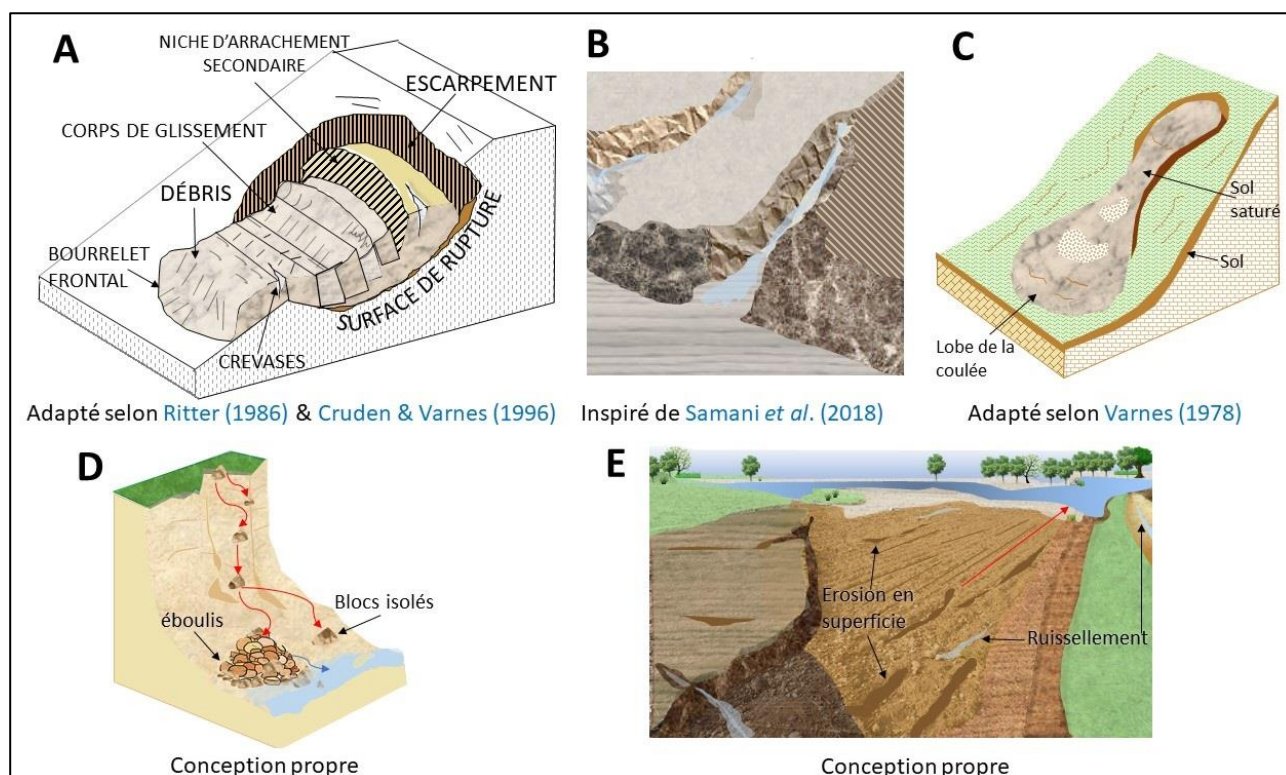
Source	Période	Echelle	Applications	
Images aériennes ANCP	2012 - 2015	1: 5.000	Repérage des processus géomorphologiques	Extraction de granulats, tas de stérile
Images aériennes Google Earth	2014 - 2018	variable		Carrières et mines de charbon, tas de stérile
Imagerie ESRI	2018	1: 5.000		Extraction de granulats
Carte topographique	1980	1: 25.000	Cartographie des anciens périmètres miniers Analyse de la pente et des anciens processus géomorphologiques	
Carte géologique	Feuilles de carte au milieu des années '60	1 : 200.000	Vérification du substrat sous-jacent peu résistant aux certains processus : - Glissements de terrain (substrat argileux) - Chutes de pierres (sables, graviers et grés)	

Nous avons essayé de cartographier les éléments dans leur forme, leur position et leur extension aussi proches que possible du présent. C'est pourquoi les images aériennes les plus récentes (après 2015) ont été privilégiées comme imagerie de base dans le repérage et la vectorisation des processus. En leur absence, sur certaines parties du bassin de la rivière Jiu l'imagerie aérienne de 2012 a été utilisée, tandis que la carte topographique des années '80 a permis de vérifier la forme des courbes de niveau et l'existence de certaines zones d'extraction du charbon.

En ce qui concerne les processus géomorphologiques responsables de l'activation des sources alluviales potentielles, nous avons considéré et cartographié cinq catégories de mouvements de matériaux sédimentaires qui pourraient alimenter le flux alluvial des rivières. Pour la cartographie, *les glissements de*

*terrain, les ravines, les coulées, les chutes de pierres et l'érosion en nappe* ont été pris en compte en tant que processus géomorphologiques générateurs de sédiments dans les rivières (**Figure IV.11**). Leur évaluation ultérieure comprend la classification des mécanismes, l'estimation des dimensions, les taux de déplacement dérivés et la formulation des hypothèses possibles sur leurs intervalles de récurrence.

**Les glissements de terrain** (**Figure IV.11 A**) sont des phénomènes d'origine sismique, géologique ou géophysique caractérisés par le glissement d'une masse de terre sur un plan incliné résultant d'une rupture de cisaillement [Goudie, 2014]. Les facteurs majeurs favorisant les glissements de terrain sont la pluviométrie, la topographie (liés à la pente) et la lithologie (notamment la présence des roches de type argileux). Dans la littérature scientifique roumaine [Joly (1997); Rădoane et Ichim (2001); Grigore (2003); Ielenicz, (2004)] et étrangère [Cruden et Varnes (1996) ; Hungr *et al.* (2001)], les glissements de terrain sont classés selon plusieurs critères : la profondeur de la couche de matériau glissant, la vitesse de déplacement, la direction de l'évolution, la cause génératrice, la forme du matériau glissant, le mode de manifestation, etc. Dans notre étude, nous avons utilisé comme attribut **la profondeur** jusqu'à laquelle le glissement entraîne les matériaux, puisque nous n'envisageons pas une cartographie très détaillée du phénomène, mais plutôt un inventaire et une analyse de la relation avec le réseau hydrographique.



**Figure IV.11.** Schéma des 5 processus géomorphologiques cartographiés. **A** – Glissements de terrain ; **B** - Ravines ; **C** - Coulées ; **D** - Chutes de pierres ; **E** - Erosion en superficie (ou en nappe)

**Les ravines** (**Figure IV.11 B**) sont des chenaux creusés dans des matériaux généralement non-consolidés, avec des côtés escarpés, servant de canaux de drainage occasionnels [Velcea et Costea, 2006; Kirby et Bracken, 2009]. Les ravines en forme de V pointus sont profondes dans le sol et le dépôt en pente, sont

maintenus d'une pluie à l'autre et progressent en amont et en aval, dans leur état évolutif final formant des torrents [Ielenicz et Nedelea, 2009]. Dans notre analyse, le terme de « ravine » a été employé, comme équivalent de l'anglais « gully », une forme de relief négatif avec des caractéristiques d'une petite vallée, mais aussi d'un organisme torrentiel, comme classifié par Kirby et Bracken (2009). Nous avons appelé « ravines » à la fois les petites vallées d'érosion, individuelles ou formant des groupes en amont des versants escarpés, sans distinguer les phases plus avancées dans l'évolution d'une ravine qui, dans la terminologie roumaine sont appelés « torrents » (différent de ce qu'un torrent signifie dans l'hydrologie française ou anglophone). Le but étant d'identifier les formes d'érosion possiblement connectées aux rivières, dans la situation où les organismes torrentiels se rencontraient, la stratégie consistait à les classer dans la catégorie des ravines développées, leurs attributs ultérieurs indiquant l'impact possible sur le réseau hydrographique. La prémisse du regroupement de ces processus d'ampleur différente autour de la catégorie générale des "ravines" a été liée à leur structure et à leur fonctionnement commun [Osterkamp, 2008 ; Kirby et Bracken, 2009]. Les ravines peuvent se comporter comme des véritables voies de transport des sédiments fins détachés durant une forte pluie de la zone amont, vers la zone aval qui peut être connectée ou non avec un lit de rivière.

**Les coulées (Figure IV.11 C)** sont des déplacements d'un fluide visqueux, ayant une vitesse supérieure à la superficie et décroissante vers la partie basale [Varnes, 1978 ; Hungr et al., 2014]. Elles se caractérisent par des mouvements différentiels internes répartis dans la masse [Goudie, 2014]. Dans beaucoup de cas, les coulées sont des événements finaux succédant un glissement de terrain ; la distinction entre les deux processus n'est pas définie à ce stade, la différence étant que les particules individuelles de la coulée voyagent séparément dans la masse en déplacement [Rădoane et al., 2001]. Dans d'autres cas, le flux est entraîné dans un écoulement organisé sur des organismes torrentiels préexistants [Bălteanu, 1974]. Le matériel est composé de roches de petite granulométrie hautement fracturées, des débris clastiques dans une matrice fine ou des grains de petite taille [Hungr et al., 2001]. Ces processus sont aussi connus comme les *coulées de boue*. Cependant, nous ne pouvons pas nous permettre d'utiliser un terme autre que celui général de "coulées", car ajouter l'attribut "de boue" reviendrait à restreindre ce processus à la catégorie désignant le matériau fin et non le débris aussi. Or la coulée dans son sens physique est distinguée en effet par la déformation irréversible continue d'un matériel qui se produit en réponse à une contrainte appliquée, quelque soit sa texture [Varnes, 1978]. Les coulées sont d'intérêt pour expliquer le flux solide des rivières dans des études comme le nôtre, à la fois en termes de leur *cinématique* (les coulées sont les plus rapides parmi les différents types de mouvements de terrain, d'une vitesse de quelques mètres par jour ou même par heure) et de leur *granulométrie fine* (le matériau d'une coulée est typiquement composée d'au minimum 30% d'eau et 50% de limons, vases et autres matériaux argileux), participant ainsi de manière importante à l'augmentation de la concentration des matières en suspension des rivières [Varnes, 1978 ; Velcea et Costea, 2006].

**Les chutes de pierres (Figure IV.11 D)** sont des mouvements rapides d'une masse de roches le long de la pente d'un versant, lorsque les forces motrices liées au cisaillement des discontinuités dépassent les forces résistantes des roches [Varnes, 1978]. La perte de résistance est due aux contraintes mécaniques induites par la



pesanteur de la couche supérieure des falaises, des escarpements rocheux ou des blocs provisoirement immobilisés. La perte d'équilibre se produit généralement à cause de certaines activités anthropiques déstabilisatrices : trafic intense, pâturage excessif, stockage de déchets, chantiers de construction dans des zones géotechniques et à risque sismique élevé [Velcea et Costea, 2006]. En fonction du volume total, le phénomène se distingue par [ORRM - PACA]: a) une chute de pierres ou de blocs isolés (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de m<sup>3</sup>); b) des éboulements (de plusieurs centaines à plus d'un million de m<sup>3</sup>). Concernant la dernière catégorie, un éboulis est un mouvement de translation d'une roche qui se produit le long d'une surface plus ou moins plane ou légèrement ondulée [Goudie, 2014]. Bien que les chutes de pierre soient constituées de débris ou des éléments grossiers [Varnes, 1978] et une fois atteignant le lit d'une rivière, les matériaux ne peuvent pas être entraînés par l'eau que lors des grandes crues, nous considérons, cependant, trois arguments en faveur de l'importance de ces processus pour la formation et le transfert des alluvions : 1) dans leur mouvement par basculement, roulement, charriage ou chute libre, ces roches grossières peuvent également entraîner le déplacement de particules plus fines du substrat du versant ; 2) une fois déposées sur les lits des rivières, ces roches vont former le pavage grossier (constitué de gravier et galets) qui abrite le substrat le plus fin disponible pour la mobilisation à des débits plus élevés ; 3) comme nous avons essayé d'esquisser dans la figure ci-dessus, une masse de roches déposés le long ou à travers d'une vallée peut influencer le débit solide par le barrage partiel ou total d'une rivière, provoquant même des déviations du cours d'eau, avec des conséquences sur le débit solide (activation par érosion de nouvelles sections du lit).

**L'érosion en nappe (Figure IV.11 E)** est un processus de détachement du sol sous l'effet de gouttes de pluie, son transport par un écoulement en nappe peu profond et son acheminement dans des rigoles [Jain et Singh, 2003 ; Morgan, 2004]. Ce processus est connu dans la littérature anglophone sous le nom de "*rill and interill erosion*" et peut être développé dans différentes conditions de pente (morphologies diverses et pente faible ou nulle). Dans certaines références, on trouve ces deux termes (*angl.* « interrill » et « sheet erosion ») interchangeables [Gilley, 2005; Das, 2009]. Un autre terme assez souvent employé est « l'érosion laminaire ». Suivant ces différentes dénominations, une classification complète des types d'érosion et des caractéristiques des microformes de relief résultantes est donnée par Diaz Mendoza (2011), en citant Suarez (1998). Si l'érosion en ravines se produit lorsque le flux concentré est suffisamment important pour former de canaux qui ne peuvent pas être traversés pendant les travaux agricoles, par l'érosion en nappe ou en superficie, les rigoles éphémères apparaissent au même endroit dans le paysage chaque année, mais elles sont suffisamment petites pour être comblées [Gilley, 2005]. D'autre part, nous pouvons regarder cette dichotomie de ce processus à la fois comme source et vecteur, les espaces inter-rigoles (*angl.* *inter-rills*) fournissant de la matière sédimentaire et les creux/ petites rigoles étant la voie de transport [Gilley, 2005 ; Gumiere et al., 2009]. L'érosion en nappe est plus importante quand il n'y a pas une couverture végétale. Les caractéristiques texturales du sol et le degré de cimentation des particules de sol jouent également un rôle important dans l'un ou l'autre des processus [Jain et Singh, 2003]. C'est pourquoi les organismes gouvernementaux (US Soil Conservation Service) s'efforcent de sensibiliser davantage à cette catégorie de source de production sédimentaire, longtemps négligée. L'érosion



en nappe est considérée comme une source considérable de sédiments fins dans les systèmes fluviaux [Jain et Singh, 2003 ; Rădoane et Rădoane, 2007]. En Roumanie, l'érosion en surface a été estimée comme la source de 54% de la quantité totale de matériaux érodés [Moțoc, 1984, cité par Rădoane et Rădoane, 2007].

Les attributs que nous avons accordés aux 5 processus géomorphologiques sont mentionnés dans le **Tableau IV.4** et détaillés ci-après.

**Tableau IV.4.** Attributs utilisés pour la caractérisation des processus géomorphologiques<sup>18</sup>

Attributs	Glissements de terrain	Ravines	Coulées	Chutes de pierres	Erosion en nappe
<i>Profondeur</i>	X				
<i>Activité</i>	X	x	x	X	
<i>Rivière*</i>	X				
<i>Distance**</i>	X	x	x	X	x
<i>Pente***</i>	X	x	x	X	x
<i>Largeur</i>		x			
<i>Interface</i>	X		x		
<i>Impact</i>	X		x		

Ces attributs fournissent les informations mentionnées en bas sur les processus géomorphologiques cartographiés, le même attribut ayant parfois des significations différentes d'un processus à l'autre.

- **Glissements: Profondeur** (superficielle < 1,5 m, moyenne 1 – 3 m, profonde >3 m), **Activité** (active, dormant), **Distance\*\*** (0 = connectée, ≠0 – distance au long de la pente), distance=0, confirmée avec les résultats de l'Interface et Impact, **Rivière\*** (longueur du chenal affectée), **Pente\*\*\*** (Naturelle, Carrière, terrils de charbon), **Interface, Impact**.

- **Ravines: Activité** (fonctionnelle, non-fonctionnelle), **Distance\*\*** (indique l'existence de la connectivité : 0/ ≠0), **Largeur** (s'il y a un groupe de plusieurs ravines = complexe des ravines), **Pente\*\*\*** (Naturelle, Carrière, terrils de charbon).

- **Coulées: Activité** (actives, stabilisées), **Distance\*\*** (indique l'existence de la connectivité), parfois **Interface** et **Impact** appliqués, **Pente\*\*\*** (Naturelle, Carrière, terrils de charbon).

- **Chute de pierres: Activité** (potentielles, en déséquilibre actuel), **Distance\*\*** (indique l'existence de la connectivité), **Pente\*\*\*** (Naturelle, Carrière, terrils de charbon).

- **Erosion en nappe/ en superficie: Distance\*\*** (indique l'existence de la connectivité), **Pente\*\*\*** (Naturelle, Carrière, Terrils de charbon).

Les attributs « **Interface** » et « **Impact** » définissent les zones de contact pente/ versant – canal/ lit à l'aide des systèmes de classification nominaux et par une petite série de mesures quantitatives (longueur du lit

<sup>18</sup> \*Rivière → longueur du chenal affecté

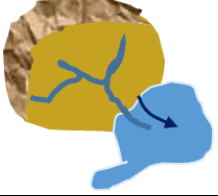
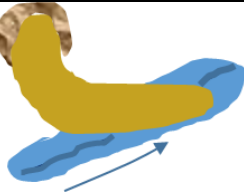
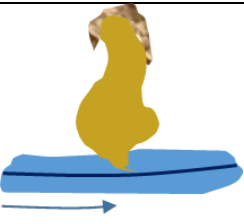


\*\*Distance → (mesurée au long de la pente) par rapport au réseau de la rivière (m)

\*\*\*Pente → Type de surface sur laquelle le processus s'est développé. L'intérêt est typiquement de voir si le processus a été généré de manière naturelle ou s'il résulte d'une activité anthropique

affecté, nombre et superficie des processus de pente affectant les lits des rivières). La priorité a été donnée à la cartographie et à l'évaluation du degré de couplage avec les lits fluviaux. Une attention particulière a été donnée aux deux zones d'extraction du charbon, par la cartographie des terrils (ou dépôts de stériles) qui sont très instables et se comportent comme un fournisseur de sédiments fins pour les rivières pendant les crues.

En ce qui concerne les catégories d'interface, nous avons appliqué la classification de [Korup \(2005\)](#), qui indique les possibles positions du processus géomorphologique par rapport à la rivière potentiellement affectée (**Tableau IV.5**).

**Tableau IV.5.** Classification nominale des interfaces de couplage géomorphologique entre les glissements de terrain et les coulées et le chenal/ lit fluvial [d'après [Korup, 2005](#)]

Interfaces de couplage géomorphologiques	Caractéristiques
<p>1</p> 	<p><i>Surfacique</i> : Le mouvement de masse &gt; 10 km<sup>2</sup> s'étend sur les interfluves ou les lignes de partage d'eaux et/ou détruit le fond des vallées (par exemple écroulement des versants, expansion latérale, déformation gravitationnelle profonde des versants)</p>
<p>2</p> 	<p><i>Linéaire</i> : Plus de la moitié du glissement/ une coulée s'étale au long de la ligne d'écoulement/drainage (chutes de rochers canalisées, avalanches de pierres, glissements de terrain transformés en des coulées de débris) après avoir entré dans un chenal saturé avec de l'eau</p>
<p>3</p> 	<p><i>Ponctuelle</i> : Situation d'un dépôt de glissement de terrain/ de coulée à un angle plan normal ou presque normal par rapport au chenal</p>
<p>4</p> 	<p><i>Indirecte</i> : Le glissement de terrain/ la coulée entre dans une masse d'eau (par exemple une rivière, un lac etc.)</p>
<p>5</p> 	<p><i>Nil*</i> : Le glissement de terrain/ la coulée est découplé(e) du point de vue géomorphologiques [<a href="#">Harvey, 2002</a>, cité par <a href="#">Korup (2005)</a>]; aucun contact physique entre le front du dépôt et le chenal.</p> <p>Nil* :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Nh</i> – suspendu(e) sur la pente (stockage colluvial)</li> <li>• <i>Nv</i> – tamponné(e) dans la vallée</li> <li>• <i>Ni</i> - sur neige ou glace</li> </ul>

Dans le cas où le réseau hydrographique est affecté par les processus géomorphologiques, on se pose la question sur le type de l'impact. Celui a été classé en plusieurs types (**Tableau IV.6**).

**Tableau IV.6.** Classification nominale de l'impact des glissements de terrain/ coulées sur les chenaux des rivières

	<b>Classe géomorphologique d'impact</b>	<b>Diagnostic de la forme résulté lors du type d'impact entre le glissement/ la coulée et le chenal</b>
1	<i>Tamponné</i>	Aucun contact physique perceptible entre le pic du glissement et le chenal
2	<i>Riverain</i>	Le glissement pénètre un peu ou affecte le chenal ; front concave, dominance nette de l'érosion fluviale
3	<i>Occlusion</i>	Diversión du chenal autour d'un pic convexe du glissement/ de la coulée (ou barrage de glissement percé), par rapport au chenal en amont et aval de la zone de contact
4	<i>Blocage</i>	La création d'un lac de barrage par le glissement/ la coulée
5	<i>Oblitération</i>	Enterrement complet du fond de la vallée, création des lacs ou étangs par le glissement, capture des eaux, renversement ou caractère chaotique du drainage

L'inventaire des processus géomorphologiques a permis d'identifier des sources potentielles de sédiments en termes de dépôts de pente, y compris des dépôts artificiels. Afin de compléter la base de données des processus géomorphologiques, il était nécessaire d'identifier d'autres éléments pouvant agir en tant que sources d'alluvions. Dans le bassin de la rivière Jiu, on considère qu'il y a deux catégories majeures d'activités économiques favorisant la production supplémentaire des alluvions ou de la déstabilisation des versants et des lits des rivières : *(i)* les extractions de granulats et *(ii)* l'industrie du charbon. Selon le Réseau Eau - France Nature Environnement (2000), les gravières sont une forme d'exploitation d'une ressource alluviale non renouvelable, dont les impacts peuvent être observés, pouvant être divisés en impacts volumétriques, impacts sur les débits liquides et solides des cours d'eau et impacts piézométriques. Les gravières déstabilisent les flux hydro-sédimentaires et les lits des rivières, étant le plus souvent localisées dans des points critiques du profil longitudinal des rivières souvent, sans autorisation ou étude d'impact préalable. En coupe transversale, les gravières sont également situées dans des points critiques pour le transfert et l'accumulation d'alluvions. Ce problème d'emplacement est cependant inévitable, car les stocks de sables et graviers soumis à l'exploitation se trouvent dans la bande de mobilité latérale des rivières et participent à la dynamique hydro-sédimentaire. L'exploitation de ces dépôts alluvionnaires entraîne ainsi une déstabilisation du lit et favorise l'érosion [Obreja, 2003 ; Malavoi, 2003]. Malavoi et ses collab. (2007) considèrent les gravières comme uns des facteurs de contrôle principaux de la matière sédimentaire transitée par les rivières.

Le deuxième type d'activité économique pouvant entraîner la déstabilisation des dépôts de sédiments (d'origine naturelle et surtout anthropique) est dans le bassin de la Jiu l'exploitation du charbon. Celle-ci a un impact indirect sur le réseau hydrographique, notamment à travers les formes de relief anthropique des décharges de résidus miniers (les terrils), qui peuvent à tout moment perdre la stabilité et devenir des sources de sédiments par l'action de processus géomorphologiques activés lors des pluies torrentielles.

Le problème de l'apport des matières charbonneuses des zones d'extraction du charbon vers les rivières a sensibilisé l'opinion publique en 1966 et en 1970, quand 60 millions de tonnes de débris de charbon (déchets grossiers, boues et résidus) ont été signalées [Bishop, 1970]. Les problèmes d'instabilité des terrils de charbon

et les effets sur l'augmentation de la quantité d'alluvions transitant le bassin de la Jiu ont été reconnus mais n'ont pas été suffisamment étudiés en Roumanie [Rădoane *et al.*, 2008; Lazăr, 2017].

En conclusion, les trois catégories (possibles sources/stockages de sédiments fins) qu'on a cartographiées, en plus des processus naturels, sont :

- **Les gravières (exploitations de granulats, notamment du sable, dans les lits des rivières ou les plaines alluviales) ;**
- **Les mines et les carrières de charbon ;**
- **Les tas de stériles (terrils) de mines.**

Leur identification et délimitation ont été réalisées sur la base de différents documents cartographiques et inventaires obtenus des archives en ligne des institutions chargées avec leur gestion (La Division Minière de Târgu Jiu, le Complexe Energétique de l'Olténie, le Complexe Energétique Hunedoara, la Succursale Minière de Petroșani, le Ministère des Eaux et des Forêts, l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement, la Garde de l'Environnement, l'Agence Nationale des Eaux Roumaines et l'Agence Nationale pour les Ressources Minérales). La cartographie de ces processus a été réalisée par délimitation de polygones.

Par rapport aux processus naturels, pour les formes de relief engendrées par ces activités anthropiques, nous n'avons pas considéré des attributs.

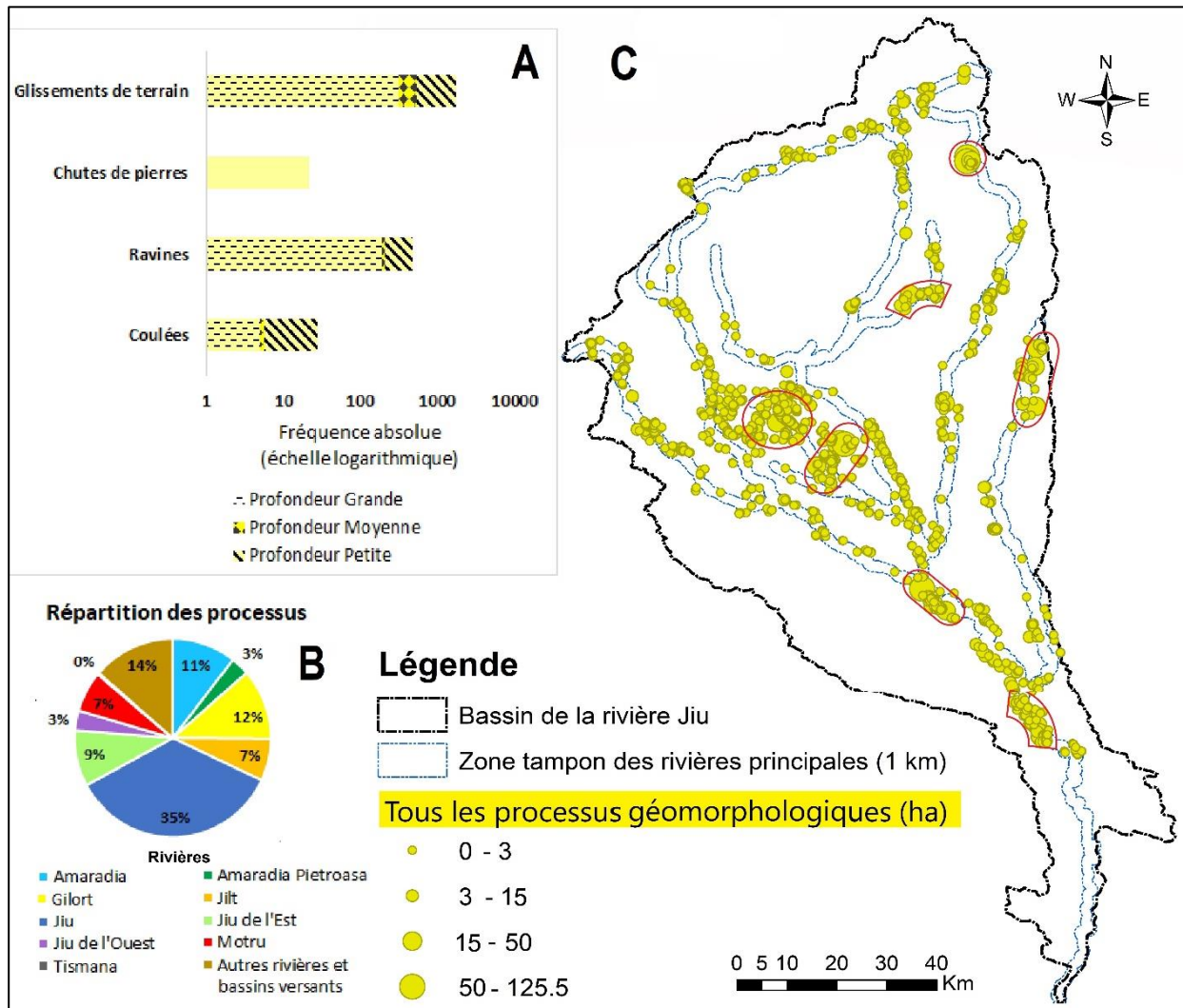
## 4.2.2. Résultats et discussions

### 4.2.2.1. Les processus géomorphologiques induits par des causes naturelles

L'analyse cartographique recense 1729 processus géomorphologiques, dont la superficie totale est d'environ 2332 ha. Sur la **Figure IV.12 - C** les zones présentant la plus forte densité de processus géomorphologiques de grande surface sont marquées de contours rouges. Les processus qui affectent les plus larges surfaces se situent dans le Piémont Gétique, correspondant principalement à la zone superposée au bassin de la rivière Jił et au bassin d'exploitation du lignite de Motru - Rovinari. Également, dans le cours supérieur de la rivière Amaradia, les processus affectent des zones plus vastes (**Figure IV.12 – B**). Le long de la rivière Jiu, des processus avec des aires importantes se trouvent dans le secteur inférieur, où une série de glissements de terrain affecte les versants qui accompagnent la plaine alluviale de la rivière. Les **Figures IV.12 A et C** montrent que les glissements de terrain sont dominants à la fois en surface et en nombre, ainsi que dans la profondeur à laquelle ils atteignent, la plupart d'entre eux étant de grande profondeur. Il convient de mentionner que les statistiques illustrées dans la **Figure IV.12** ne concernent que 4 processus géomorphologiques sur 5, l'érosion en nappe n'étant pas ciblée. Aussi, la profondeur ne regardait pas les chutes de pierres qui n'ont été analysées que du point de vue de la surface occupée et, comme nous le verrons plus loin, du point de vue lithologique.

En ce qui concerne les autres attributs, nous présenterons les résultats les plus pertinents à titre d'exemple quelques images des processus géomorphologiques cartographiés (**Figures IV.13 et IV.14**).



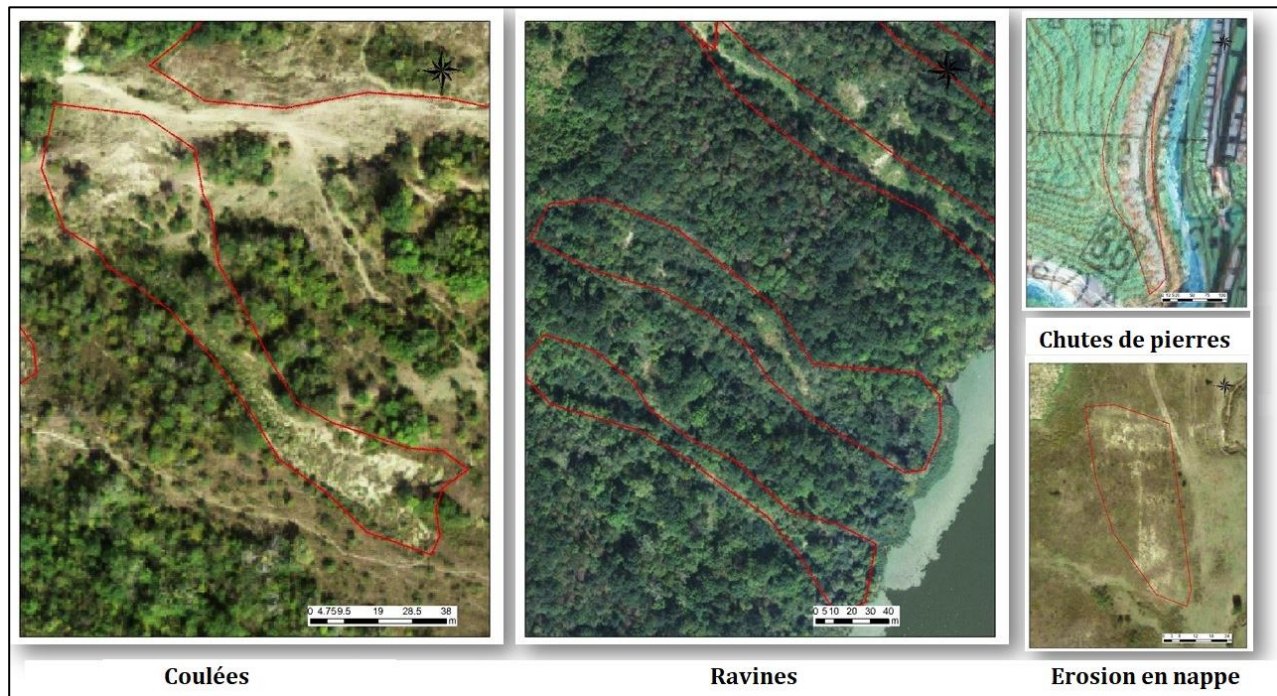


**Figure IV.12.** Représentation des processus géomorphologiques cartographiés le long des rivières principales : **A** – La fréquence absolue des processus géomorphologiques et leur profondeur ; **B** – La répartition des processus géomorphologiques sur les rivières ; **C** – La carte des processus géomorphologiques en fonction de leur superficie



**Figure IV.13.** Trois exemples de glissements de terrain différenciés par leur profondeur (Source des images : ANCP)





**Figure IV.14.** Exemples de processus géomorphologique cartographié : coulées, ravines, chutes de pierres, érosion en nappe (Source des images : ANCPI)

Les glissements de terrain étant plus nombreux et étudiés du point de vue de plusieurs attributs, ils sont illustrés par plusieurs exemples que les 4 autres processus.

Chacune des 3 classes de profondeur considérées dans l'analyse (faible profondeur lorsqu'elle est inférieure à 1,5 m; moyenne - comprise entre 1,5 et 3 m et respectivement - supérieure à 3 m) est illustrée par une image différente. Ces évaluations n'ont pas été effectuées sur la base de mesures sur le terrain, mais en fonction du rapport entre sa surface et le matériau impliqué dans le mouvement le long de la pente, etc.). L'appréciation de la profondeur s'est faite surtout sur des caractéristiques de forme du glissement et sur la base des déformations visibles sur le terrain (végétation, corps glissant etc), ainsi que sur l'épaisseur du corps glissant observer sur les cartes topographiques ou les images aériennes.

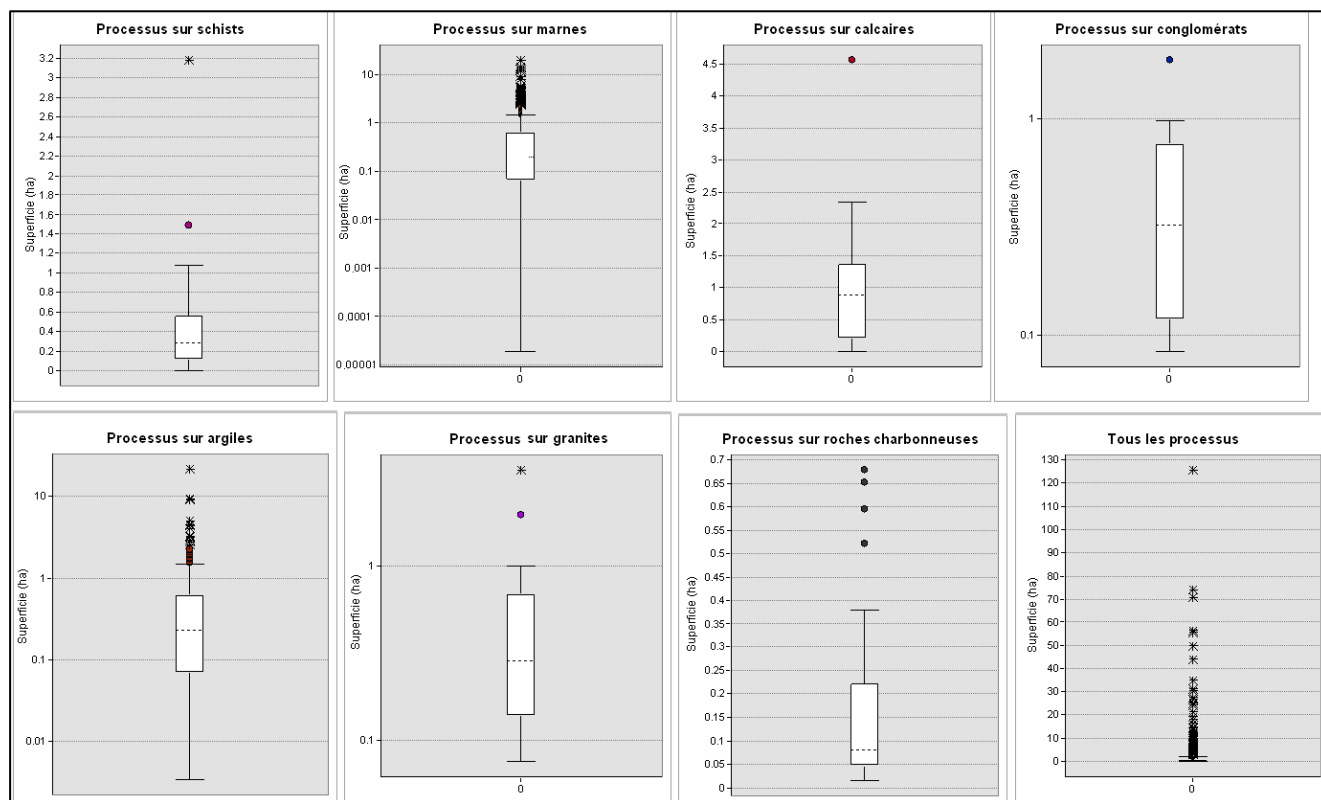
Premièrement nous avons cherché à savoir comment ces processus sont associés à différentes formations lithologiques. Les roches les plus susceptibles pour engendrer des processus de versant et qui ont retenu notre attention sont : *les schistes* (pour les chutes de pierres), *les marnes et les argiles* (pour les glissements de terrain et les coulées), *les conglomérats et les calcaires* (pour tout processus qui se forme à la base de la dissolution et l'érosion de surface), *les granites* (pour analyser à quel point leur résistance empêche la genèse de certains processus de pente), *les roches charbonneuses* (pour voir s'il existe des endroits propice pour l'érosion et la mobilisation naturelle des particules de charbon). Les processus qui ne correspondaient à aucune des formations lithologiques d'intérêt ont été classés dans la catégorie "Autres".

Le **Tableau IV.7** illustre la synthèse des processus identifiés. La classification en facteurs des formations lithologiques désigne le nombre de processus par catégorie, tandis que la superficie rapportée est celle totale, indépendamment de la lithologie.

**Tableau IV.7.** Inventaire des processus géomorphologiques (nombre) associés aux formations lithologiques d'intérêt dans le bassin de la rivière Jiu

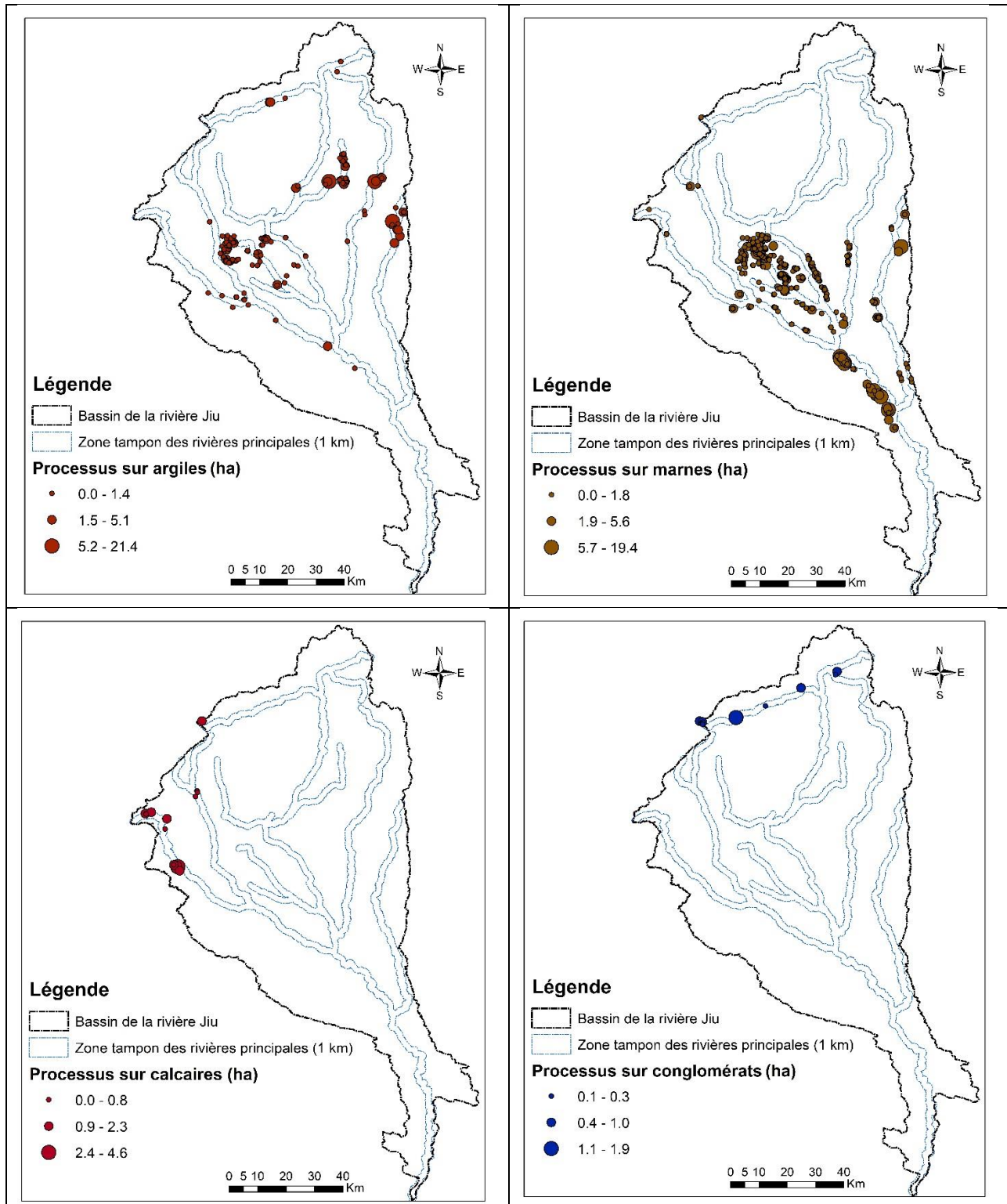
	Glissements	Ravines	Coulées	Chutes de pierres	Erosion en nappe
<i>Schists</i>	24	3	-	-	-
<i>Marnes</i>	608	10	2	-	-
<i>Calcaires</i>	10	5	-	-	-
<i>Conglomerates</i>	8	-	2	-	-
<i>Argiles</i>	216	7	3	-	2
<i>Granites</i>	16	6	-	-	-
<i>Roches carbonneuses</i>	37	-	-	-	1
<i>Autres</i>	655	81	15	16	2
<b>Superficie (ha)</b>	<b>1802.7</b>	<b>474</b>	<b>28.6</b>	<b>19</b>	<b>7.5</b>

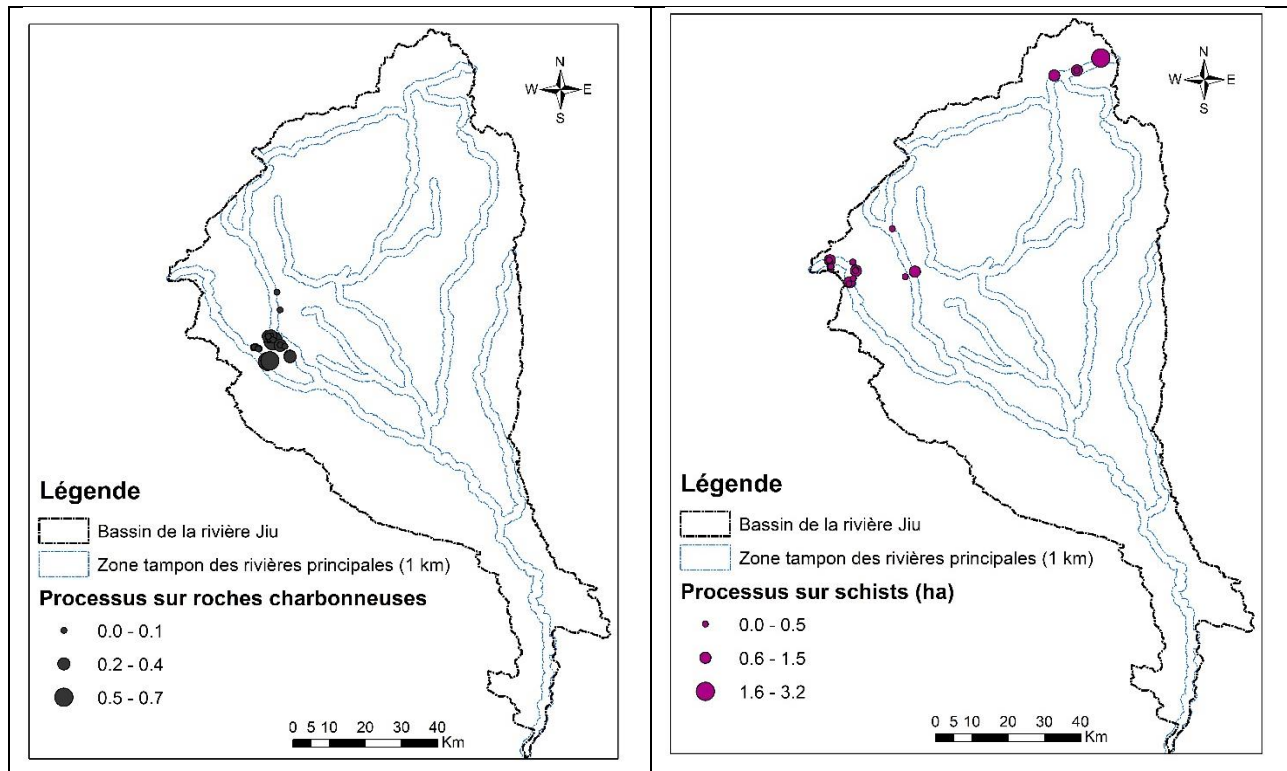
Les *Figure IV.15* et *IV.16* montrent la distribution de la surface occupée par les processus géomorphologiques identifiés sur chaque formation lithologique. On remarque la grande extension spatiale des processus développés sur les roches marnieuses et argileuses. Nous avons aussi identifié 16 glissements et 6 ravines sur des granites, ce qui est inhabituel pour ce genre de roche dure et qui ne favorise pas la formation des sols facilement érodables. L'évolution d'un glissement de terrain ou d'une ravine sur les surfaces qui ont en base des granites s'explique dans notre cas par l'emplacement des tas de stériles minier dans le bassin supérieur de la rivière Jiu et la déstabilisation du terrain qui est en-dessous.



**Figure IV.15.** Statistique des superficies occupées par les processus géomorphologiques selon les formations lithologique. Dans les cas où l'écart entre le minimum et le maximum est grand, les surfaces occupées par les processus géomorphologiques de différentes lithologies ont été représentés sur des axes logarithmiques

Cela concerne les sous-bassins des rivières Gilort et Motru notamment (*Figure IV.16*), recouverts dans leur grande partie d'alternances marno-calcaires favorisant l'érosion et les instabilités de versant. A l'opposé, très peu de processus apparaissent sur les conglomérats et calcaires et encore moins sur les granites. Les processus sur les argiles et les marnes sont les plus répandus, tandis que les processus sur les autres formations lithologiques sont plus rares.





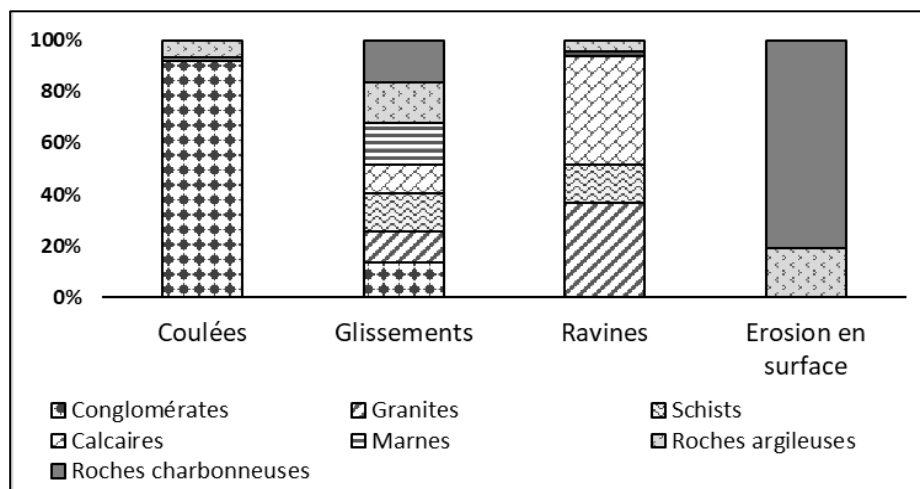
**Figure IV.16.** La répartition spatiale des processus géomorphologiques selon la lithologie

Les processus sur les calcaires et les conglomérats sont localisés le long de la Jiu de l'Ouest, de la Jiu de l'Est et le cours supérieur de la rivière Motru et de son affluent Coșuștea. Même si on s'attend que la présence des roches marno-charbonneuses à la surface et la prédisposition du terrain aux processus géomorphologiques soit dans la partie centrale du bassin de la rivière Jiu (dans la zone d'extraction du lignite de Motru – Rovinari), en réalité le terrain dans cette zone n'est pas trop susceptible aux processus, sauf si l'homme y intervient.

Les processus développés sur les roches charbonneuses ont été identifiés que dans le secteur inférieur de la rivière Coșuștea, affluent de la rivière Motru. Ces processus sont plutôt naturels, car il n'y a pas d'autres exploitation de charbon à jour en dehors de la carrière de Hușnicioara située beaucoup plus en amont.

Les formations schisteuses (uniquement des glissements de terrain et des ravines) se produisent uniquement le long de la Jiu de l'Est et dans le bassin supérieur de la rivière Motru et de son affluent, Coșuștea, où les schistes s'intercalent avec les calcaires jurassiques. Par conséquent, notre hypothèse initiale selon laquelle les matériaux sédimentaires provenant de chutes de pierres pourraient descendre en aval par le biais de processus d'érosion et transport fluvial au fil de décennies ne peut pas être démontrée ici. En effet, les processus de chutes de roches ont été trouvées plutôt sur les versants escarpés dans des zones recouvertes de roches granitiques, d'orthoamphibolites et de calcaires cristallins. Étant donnée la dureté de ce type de roches métamorphiques, elles ne peuvent pas être érodées facilement pour enrichir l'eau des rivières avec des matières fines en suspension. Nous allons donc concentrer notre attention sur les quatre autres processus géomorphologiques. Dans la **Figure IV.17**, on observe aussi que les roches argileuses et les marnes ont été les plus susceptibles du développement des processus géomorphologiques.





**Figure IV.17.** Proportion des groupes lithologiques associées aux processus géomorphologiques de versant

Sur les roches charbonneuses, seulement un faible nombre de glissements de terrain et de processus d'érosion en nappe ont été identifiés. Les glissements de terrain et les ravines semblent être les processus qui se développent sur la plupart des types de formations lithologiques, alors que les deux autres (coulées et érosion en nappe) semblent se développer préférentiellement sur une ou deux formations. Nous avons ainsi analysé les processus géomorphologiques en termes de leurs attributs ci-dessus présentés (§4.2.1.2.) et nous avons répertorié les résultats les plus concluants dans le **Tableau IV.8.**

**Tableau IV.7.** Les attributs les plus pertinents des glissements de terrain et les coulées (en bleu, ce qui concerne seulement les glissements ; en noir – des caractéristiques qui concernent aussi les glissements que les coulées)

Variable	Catégories	% du total
<b>MÉCANISME</b>	Coulées	8.4
	Glissements de terrain	91.6
<b>INTERFACE</b>	Surfacique	0.8
	Indirecte	0.4
	Linéaire	10.9
	Nh (stockage colluvial)	35.7
	Nv	4.6
	Ponctuelle	47.5
<b>IMPACT</b>	Blockage	0.8
	Tamponné	39.5
	Oblitération	0.8
	Occlusion	31.1
	Riverain	27.7

Les résultats sur les processus de versant fournissant des apports de sédiments fins représentent une recherche préliminaire sur la connectivité entre les versants (les parties hautes des vallées) et les lits mineurs des rivières. Le problème de la connexion entre ces processus et le réseau hydrographique est crucial, puisque les rivières sont les vecteurs de transport de la matière sédimentaire qui en résulte.

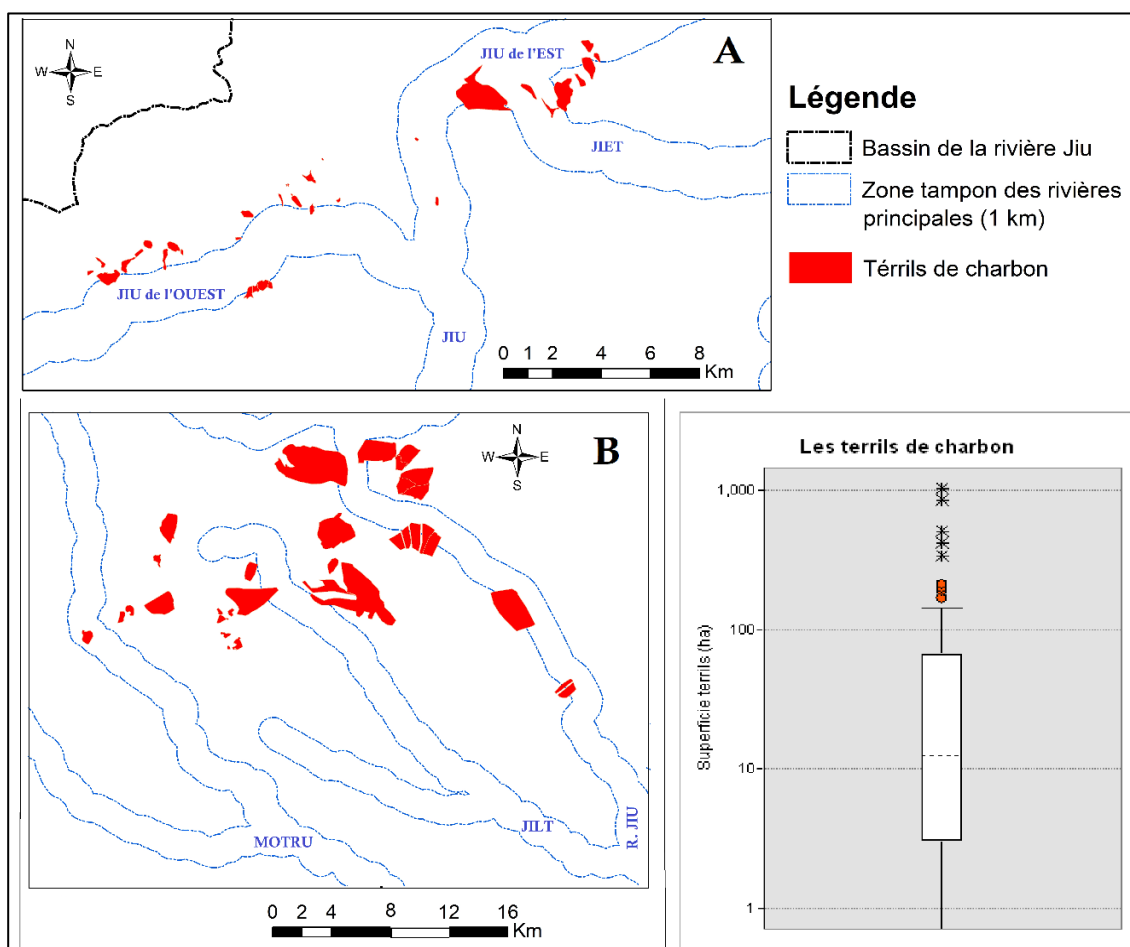
Les glissements de terrain sont dans la plupart superficiels et de profondeur modérée, moins de 20% ayant plus de 5 m de *profondeur*. Cette estimation est quand même approximative et sujette à révision, car nous n'avons pas eu les bases de données cartographiques et les instruments de mesure nécessaires pour arriver à



des estimations exactes. En ce qui concerne *l'interface* entre les processus (glissements et coulées) et le réseau hydrographique, le type ponctuel prédomine, ce qui dénote un degré de susceptibilité moyen à haut. Les interfaces surfacique et linéaire, qui sont les plus sensibles, occupent peu au-dessus de 10%. Les processus suspendus sur les dépôts colluviaux de versant (type Nh) sont toujours fréquents, cumulant environ 35% de cas. Ces derniers types d'interface ne posent pas de problèmes immédiats, mais dans le cas de processus combinés (ravines et glissements sur le versant et érosion des berges) et de déplacement du dépôt le long de la pente, celui-ci peut atteindre dans des dizaines d'années le lit de la rivière. Le type d'impact avec le réseau hydrographique est équilibré entre les processus. D'une part, presque 40% des processus sont assez loin des rivières, ne posant aucun problème direct ; d'autre part, environ 31% des processus sont localisés de façon à barrer le cours d'une rivière, étant certainement à l'origine de la dynamique latérale du chenal. Enfin, l'impact riverain est aussi présent dans beaucoup des cas (27,7%), celui-ci étant important pour des processus d'érosion fluviale de la berge concave formant la frontière commune.

#### 4.2.2.2. Les activités anthropiques impactant la production des sédiments

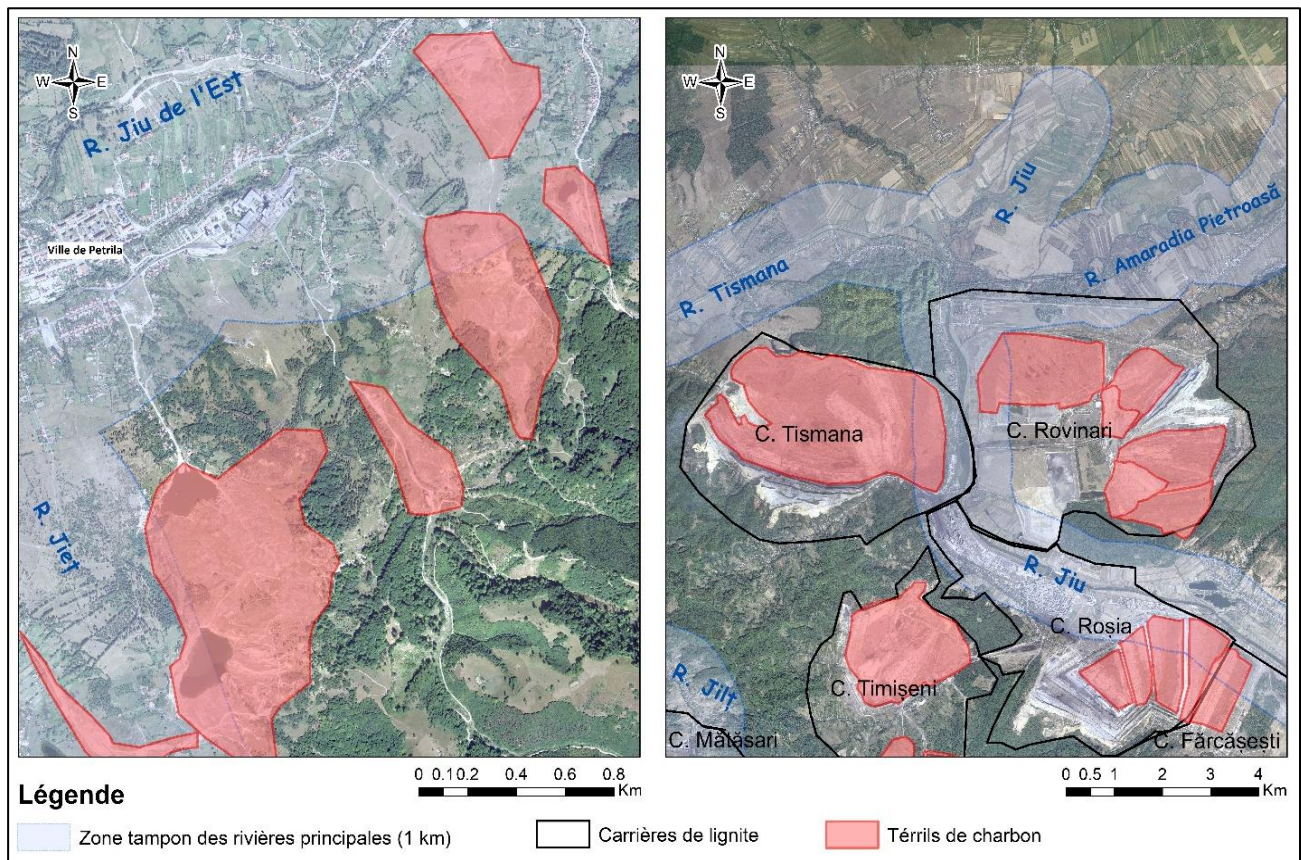
Dans cette partie notre intérêt a été porté vers les processus engendrés par l'intervention humaine sur les versants et dans les rivières: les gravières et des tas de stériles associés à l'exploitation du charbon.



**Figure IV.18.** La répartition spatiale des tas de stériles dans les deux bassins d'extraction du charbon : **A.** Secteur supérieur de la rivière Jiu (le Bassin de Petroșani) ; **B.** Secteur moyen (le Bassin de Motru – Rovinari)

Au total, 80 de tas de stériles miniers ont été cartographiés, dont plus de 50% présentent des processus géomorphologiques sur leurs versant ou à proximité (**Figure IV.18**). Les superficies des tas de stériles sont comprises entre 0,4 et 1010 ha.

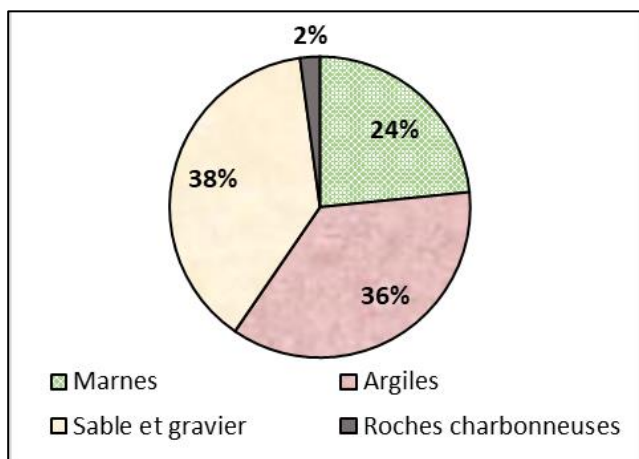
Dans la **Figure IV.19**, on illustre deux exemples de superposition partielle entre les tas de stériles miniers et la zone tampon de 1 km de largeur au long des rivières principales. On peut voir à quel point certains d'entre eux sont proches du réseau hydrographique. Si le gradient de pente dans le bassin de Motru - Rovinari (situé dans la zone de piémont) n'est pas aussi élevé, les carrières de lignite étant construites sur les interfluves et les tas de stériles sur les surfaces déjà exploitées artificiellement et nivelées, dans le bassin de Petroșani (dans la zone de montagne), la plupart des tas de stériles se trouvent sur les versants à des pentes parfois élevées, ce qui peut favoriser les processus gravitationnels.



**Figure IV.19.** Deux exemples de localisation des tas de stérile (terril) dans les bassins de la Jiu de l'Est (à gauche) et Motru – Rovinari (à droite) (*Source des images : ANCPI*)

Les processus identifiés dans les zones d'extraction du charbon ont été comptés en termes de substrat lithologique, caractéristique qui peut s'avérer cruciale dans la stabilité des tas de stériles. Nous voyons sur la **Figure IV.20**, que les tas de stériles et leurs environs, où nous avons identifié des processus géomorphologiques, se trouvent notamment sur des formations des sables et graviers, suivies par des argiles et marnes.

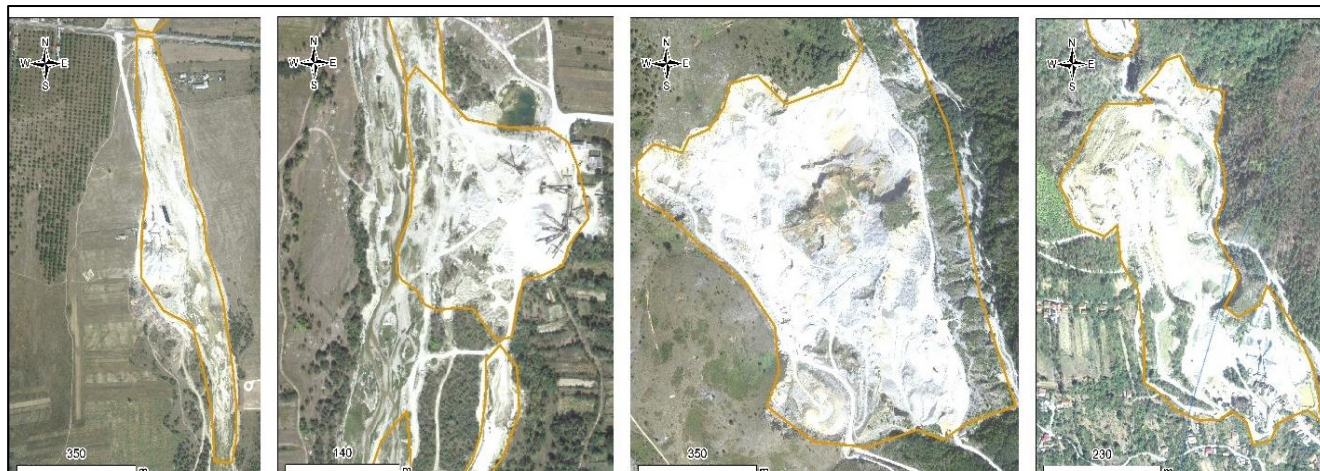




**Figure IV.20.** La lithologie des endroits avec des terrils de charbon affectés par les processus géomorphologiques

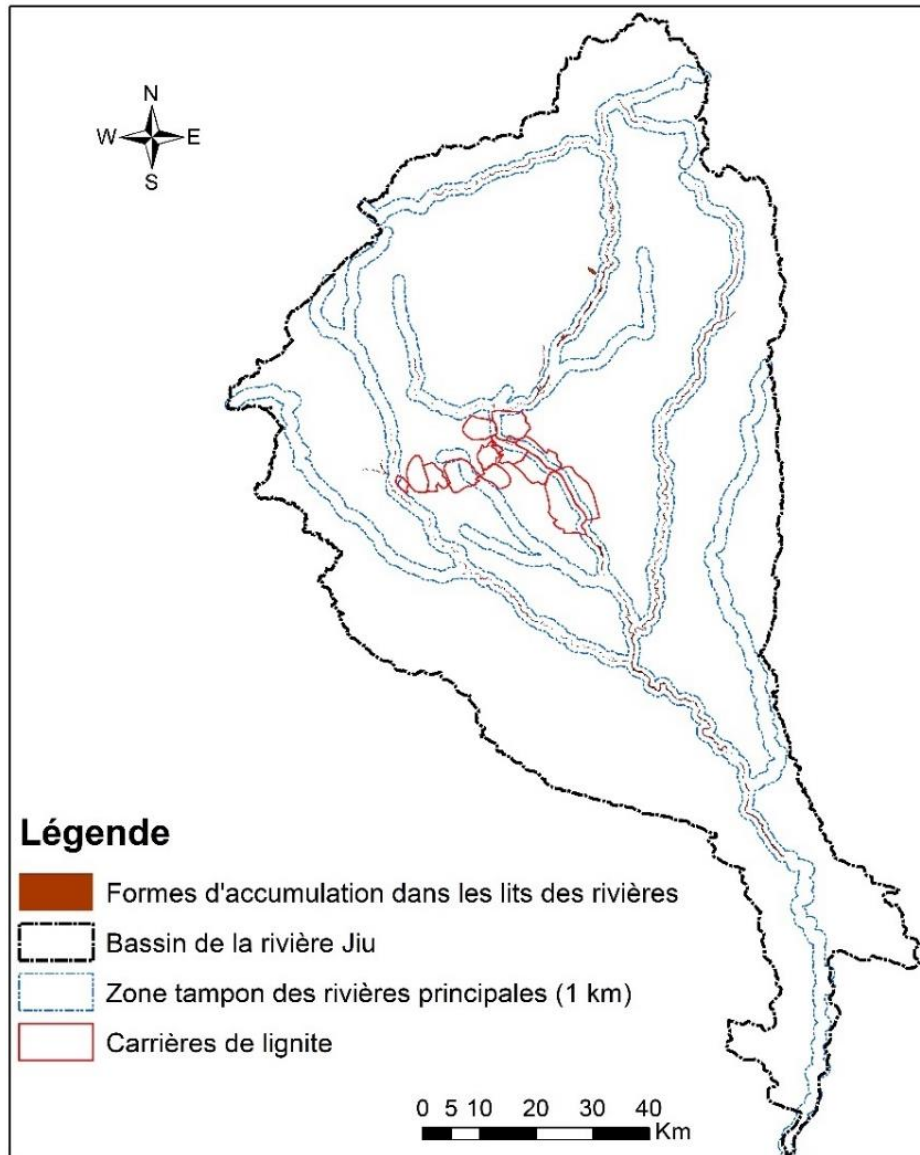
Les gravières fonctionnant des extractions de granulats dans les lits mineurs et majeurs des rivières peuvent avoir des conséquences importantes sur la dynamique sédimentaire par le transfert de matière d'un endroit à l'autre, l'élimination des volumes de sable et gravier du système fluvial et l'activation des processus d'érosion, transport et accumulation en aval de ces travaux.

Au total, nous avons inventorié dans la zone d'étude 231 de gravières avec des superficies entre 311 m<sup>2</sup> et 0,73 km<sup>2</sup>. Dans la **Figure IV.21**, nous présentons quelques exemples de gravières, sur des rivières du bassin de la Jiu. Ils ont des formes et d'extensions différentes. Généralement, ils se reconnaissent selon la couleur blanc brillant du sable à jour dans les lits de rivières et parfois par la présence d'hélices en forme de X des convoyeurs.



**Figure IV.21.** Exemples des endroits d'extraction de granulats (gravières) sur les rivières du bassin de la Jiu (Source des images : ANCP)

Afin de mettre en évidence la relation entre les gravières et les processus alluvionnaires dans les lits des rivières, nous avons analysé les formes d'accumulation dans les rivières. Au total, on a inventorié 2580 formes d'accumulation avec des superficies entre 0,67 m<sup>2</sup> et 0,73 km<sup>2</sup> (**Figure IV.22**).

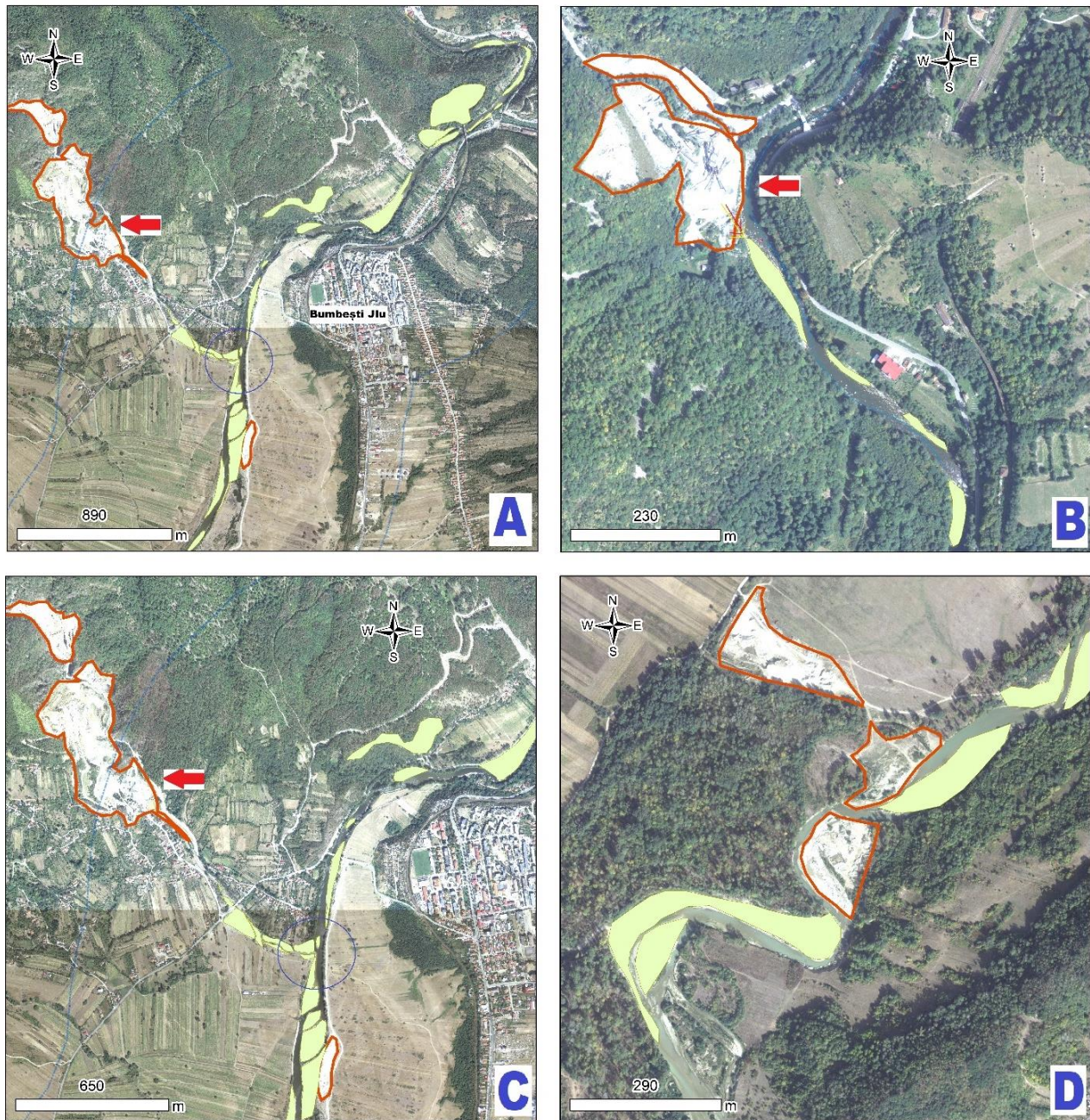


**Figure IV.22.** Les formes d'accumulation dans les lits des rivières

Par une forme d'accumulation, on a compris tous les dépôts récents de sable en principal (gravier et galets en secondaire) dans le lit mineur des rivières, sous la forme des cordons latéraux, des îles (boisées, ou sans végétation) et des plages entourées de l'eau sur trois quarts de leur périmètre (presqu'îles fluviales). Corroborant la distribution des gravières et les formes d'accumulation dans les lits des rivières, il a été constaté qu'en aval des excavations de sable et de gravier, les processus d'accumulation (dans les lits des rivières) sont plus intenses. Quelques exemples de liens de ce type sont illustrés dans la **Figure IV.23**.

L'exploitation des agrégats de sable et des granulats du lit mineur de la rivière et de la plaine d'inondation peut induire de changements importants dans la morphologie du chenal et le transport des sédiments fluviaux [Chen *et al.*, 2001; Fryirs et Brierley, 1999; Liebault *et al.*, 2002].





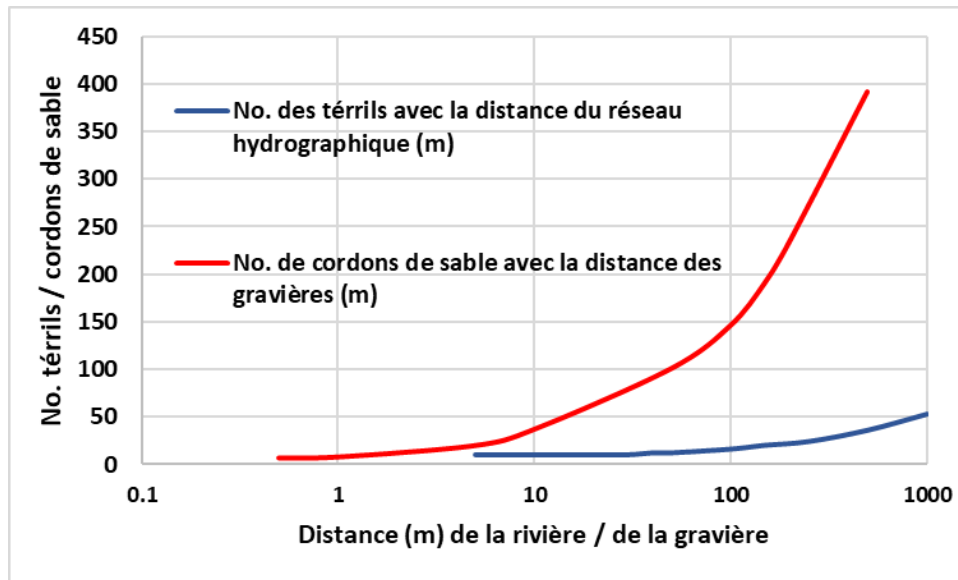
**Figure IV.23.** La position des formes d'accumulation dans les lits des rivières par rapport aux gravières. **A.** La Jiu à Bumbesti Jiu ; **B.** Confluence entre les rivières Bratcu et Jiu dans le secteur des gorges ; **C.** Confluence entre les rivières Porcul et Amaradia Pietroasă ; **D.** La rivière Gilort – origine des photos ?

#### *4.2.2.3. L'impact des processus géomorphologiques et des activités humaines sur l'accumulation des alluvions dans les rivières*

La relation entre les processus géomorphologiques sur les terrils ou les gravières et les accumulations d'alluvions dans les rivières a été étudié en mesurant la distance entre ces processus et les rivières. Dans la **Figure IV.24**, on peut voir la variation de la distance entre les terrils de charbon et le réseau hydrographique, d'une part, et entre les gravières et les cordons / îles d'accumulation dans les lits des rivières, d'autre part. Nous notons l'augmentation des formes d'accumulation en lien avec la présence des gravières dans les secteurs en

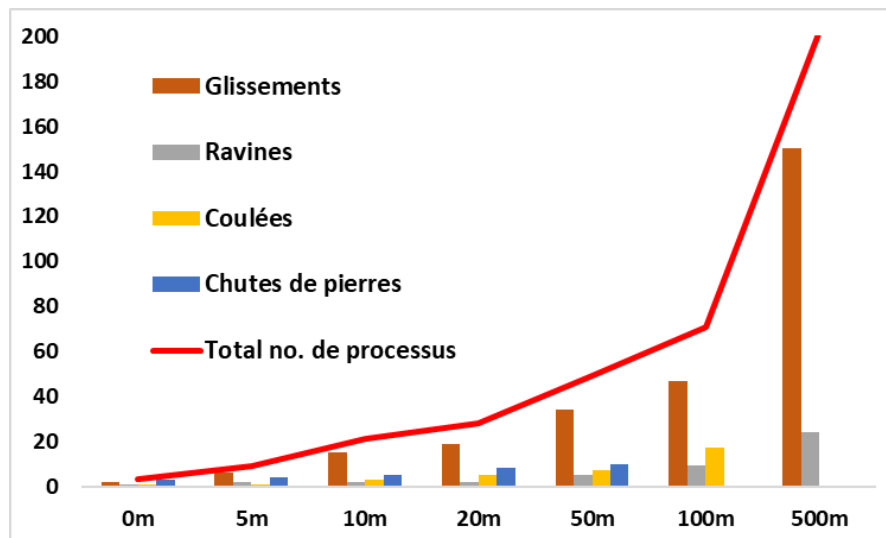


aval des confluences sur des distances allant jusqu'à 1 km. Ce lien montre en fait la création de sources de sédiments artificiels induits par les gravières.



**Figure IV.24.** Relation de distance entre les gravières et les accumulations de lit (ligne rouge) et entre les tas de stériles et les rivières (ligne bleue)

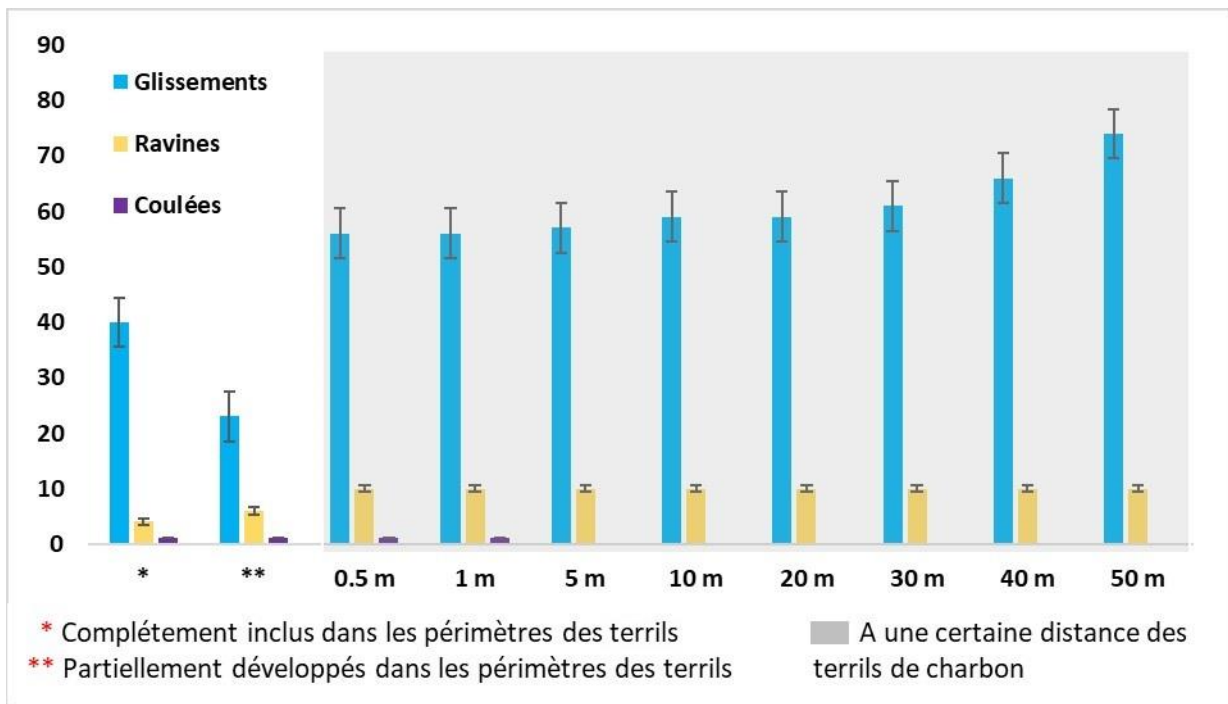
En ce qui concerne la relation spatiale (distance) entre les différents processus géomorphologiques et la présence des dépôts alluvionnaires (cordons de sable) et des tènements (*Figure IV.25*), nous constatons que la plupart des glissements apparaissent à une certaine distance par rapports aux dépôts alluvionnaires du lit (ils sont plutôt suspendus sur les versants dans la proximité des zones d'accumulation dans les lits des rivières).



**Figure IV.25.** Relation entre le nombre des processus de versant et la distance par rapport aux formes d'accumulation (les cordons de sable)

Cela remet en cause le lien étroit soupçonné entre les processus de versant et les modèles d'accumulation dans les lits des rivières. Les dépôts alluvionnaires (cordons de sable) sont très probablement formés par l'érosion latérale des rivières et par leur dynamique plutôt que par des processus géomorphologiques qui ne sont pas en relation directe avec le chenal lui-même.

En ce qui concerne la relation entre les tas de stériles minier et les processus de versant, nous constatons que les glissements de terrain se développent dans la plupart soit complètement dans l'espace des terrils, soit à une certaine distance. Les ravines ne montrent pas de préférence et leur nombre reste constant quelle que soit la distance, tandis que les coulées diminuent lorsqu'on s'éloigne des terrils (*Figure IV.26*).



**Figure IV.26.** Relation entre le nombre de processus géomorphologiques et la distance par rapport aux terrils de charbon

## Synthèse partielle 2

*En conclusion*, dans ce sous-chapitre nous avons inventorié les processus géomorphologiques et les sources potentielles d'alluvions d'origine anthropique, en analysant la relation avec les rivières, le type de contact (interface et impact), ainsi que la distribution en fonction de la lithologie. Nous avons cartographié les processus géomorphologiques d'une zone tampon de 1km le long des rivières principales et aussi les tas de stérile, les gravières et les accumulations de sables dans les lits mineurs.

Les résultats ont montré la relation entre l'existence des argiles et des marnes et la présence des glissements de terrain et aussi le rôle des terrils et des gravières dans l'occurrence des processus de versant et d'accumulation dans les chenaux des rivières. A la suite, nous allons étudier la connectivité potentielle entre les versants et les rivières et la relier avec les processus géomorphologiques et le taux d'érosion.

### 4.3. Connectivité potentielle sédimentaire

Ce sous-chapitre se propose d'analyser la connectivité sédimentaire entre les versants (vus comme zones sources potentielles de matières sédimentaires) et les rivières (les zones de transfert et de stockage intermédiaire ou final des sédiments), afin de mieux comprendre d'une manière intégrée les voies des flux

sédimentaires et le rôle de l'impact anthropique sur leur transfert à l'échelle du bassin de la rivières Jiu et de ses sous-bassins versants de la rivière Jiu.

### 4.3.1. Considérations théoriques sur la connectivité sédimentaire

#### 4.3.1.1. Le concept de connectivité sédimentaire

La connectivité des sédiments, définie comme « *le degré de liaison entre les sources de sédiments et les zones de dépôt et transfert en aval, est l'une des propriétés les plus importantes qui contrôlent l'évolution du paysage dans les bassins hydrographiques* » [Cavalli *et al.*, 2014 ; Mishra *et al.*, 2019]. Elle décrit l'efficacité du transfert de matière entre les composants de systèmes géomorphologiques tels que les versants et des rivières ou entre les différents secteurs dans le profil longitudinal d'un réseau fluvial [Wohl *et al.*, 2018]. Dans ce type d'approche, les systèmes géomorphologiques sont représentés par des réseaux formés de compartiments, de liaisons et de nœuds présentant une connectivité à différentes échelles [Kondolf et Piegay, 2003; Borselli *et al.*, 2008 ; Wohl *et al.*, 2018]<sup>19</sup>.

La connectivité des sédiments est regardée comme un cadre d'étude des processus impliqués dans le transfert des sédiments à plusieurs échelles [Bracken *et al.*, 2014]. Le concept de connectivité amont – aval peut s'appliquer pour tout flux de matière transférée au sein d'un bassin versant, même si la plupart des études et méthodes se sont concentrées sur la composante sédimentaire pour expliquer : *a*) le transfert des sédiments d'une zone source (zone d'érosion sur les versants ou les vallées ou une source anthropique) à une zone d'accumulation (à la base d'un versant ou dans les lits des rivières) et *b*) le mouvement des sédiments entre différentes zones d'un bassin hydrographique (entre les versants et les lits des rivières, un lac ou un réservoirs, ou entre les lits des rivières eux-mêmes [Borselli *et al.*, 2008; Bracken *et al.*, 2015; Poepl *et al.*, 2016; Crema et Cavalli, 2018; Heckman *et al.*, 2018].

La notion de « *connectivité sédimentaire* » a fait depuis plusieurs années l'objet de nombreuses études scientifiques dans divers domaines (hydrologie, écologie, sciences du sol, géomorphologie) qui ont permis de mieux comprendre son intérêt et la nécessité de la développer d'une manière coordonnée et interdisciplinaire. Dans le cadre du réseau international de recherche « COST CONNECTEUR » [Connecting European Connectivity Research, 2014-2018], la notion de connectivité est portée au niveau d'un paradigme, développé du point de vue conceptuel et opérationnalisé par l'utilisation des nouvelles technologies (drones,, RADAR, LIDAR, système satellitaires). Le développement des outils d'analyse de la connectivité est également soutenu par l'acquisition des jeux de données topographiques de haute résolution (par exemple, les modèles altimétriques numériques - DEM, les nuages de points - PC), afin de servir dans la gestion des bassins versants susceptibles aux processus géomorphologiques [Cavalli *et al.*, 2019]. En raison du manque de données spécialement conçues pour étudier la connectivité, peu de modèles ont été testés pour les applications des principes et méthodes de la connectivité. La plupart des études utilisent les données spatiales existantes

---

<sup>19</sup> Revoir la Figure II.13 pour le schéma général du concept de connectivité

(modèles numériques de terrain, couverture du terrain) pour évaluer les principaux facteurs de connectivité et leur évolution dans le temps [Masselink *et al.*, 2016].

Les préoccupations assez récentes portant sur l'étude de la connectivité sédimentaire ont conduit au développement des modèles conceptuels intégratifs pour comprendre : **i)** le transfert de sédiments de la source vers la zone de dépôt dans les bassins hydrographiques ; **ii)** le rôle des diverses catégories d'agents anthropiques dans la détermination des dimensions spatiales de la connectivité et des relations fonctionnelles entre ces dimensions au niveau des systèmes fluviaux ; **iii)** le rôle des processus de réglage (feed-back) à l'intérieur des systèmes dans la détermination des trajets spatiaux et du temps des réponses géomorphologiques à diverses formes d'impact anthropique et par conséquent de la sensibilité et de la résilience des systèmes fluviaux [Wainwright *et al.*, 2011; Fryrs *et al.*, 2007; Fryirs, 2013; Bracken *et al.*, 2015, Poepl *et al.*, 2016]. Selon Cossart *et al.* (2018), de nombreux auteurs se sont concentrés sur le concept de connectivité des sédiments pour prédire le « signal sédimentaire » (considéré comme un ensemble de liens et d'interactions locales entre les flux et les processus) délivré par les rivières à leur embouchure. Dans ce cadre, le principal défi consiste à connaître ce qui se passe-t-il dans la zone intermédiaire entre les zones sources (typiquement d'érosion) et les zones d'accumulation. Ces trajectoires et le temps de transfert sont encadrés dans ce qu'on connaît sous le nom de « boîtes noires » du système hydro-sédimentaire, que la notion de « connectivité sédimentaire » devrait ouvrir [Cossart *et al.*, 2018]. La connectivité est intensément débattue aussi en tant que notion décrivant le lien entre les forces motrices des flux liquides, solides et de nutriments, d'un côté, et les composantes (formes de relief) du système fluvial immobile, mais en constante évolution, d'un autre côté [Kondolf *et al.*, 2002 ; Heckmann *et al.*, 2018].

Dans les dernières années, la connectivité est devenue une question clé dans l'étude des processus agissant dans les systèmes hydro-géomorphologiques, ayant de fortes implications sur la compréhension du comportement des flux de matière liquide et solide [Cavalli *et al.*, 2019]. Compte tenu de la grande complexité des systèmes hydro-géo-morphologiques et de la variété de processus contrôlant le transfert d'eau et de sédiments à travers un bassin versant, la cartographie de la connectivité hydrologique et sédimentaire est fondamentale pour comprendre les liens entre les différentes parties du système et le rôle joué par les formes de relief naturelles et artificielles favorisant ou empêchant la continuité des voies de ruissellement et de transfert des sédiments [Marchi *et al.*, 2019; Cavalli *et al.*, 2019].

La connectivité sédimentaire a également une forte influence sur la réaction des rivières aux perturbations naturelles et humaines et elle est l'une des propriétés les plus importantes qui contrôlent l'évolution du paysage dans les bassins hydrographiques [Mishra *et al.*, 2019]. L'analyse de la connectivité sédimentaire par l'exploration des données cartographiques (cartes topographiques, MNT) pour la prédiction de la vulnérabilité face à des divers processus géomorphologiques (glissements de terre, érosion, ravins) est encore au début, mais fortement soutenue par les avancements dans les deux grands domaines de la géomorphologie appliquée : les risques géomorphologiques et le transfert des sédiments [Jurcescu 2012, 2015; Broeckx *et al.* 2016; Fox *et al.*, 2016].

#### 4.3.1.2. Les limites de la connectivité sédimentaire

A part le problème du manque d'informations entre la source des sédiments et l'endroit où leurs dépôts sont observés en aval, un autre problème concerne les types de couplage que nous pouvons appeler "connectivité". Beaucoup d'auteurs montrent que la connectivité est due aux forces motrices de la frontière versant – vallées des rivières et que ce couplage est facilité ou limité en fonction de l'existence d'obstacles au transfert des flux de matière [Wohl *et al.*, 2018 ; Bracken *et al.*, 2015]. Les structures naturelles (formes de relief) et anthropiques peuvent agir à la fois comme facteurs favorables de la connectivité ou comme obstacles. Trois types d'obstacles qui entravent le transport des sédiments en limitant la connectivité entre les compartiments du système ont été définis (**Figure IV.27**) : **A** - zones tampons (angl. « buffers »), **B** - barrières et **C** - couvertures (angl. « blankets »), [Fryirs *et al.*, 2007].



**Figure IV.27.** Les trois types d'obstacles dans la connectivité sédimentaire (**zones tampons ; barrières ; couvertures**) (les photos sont tirées lors de nos missions de terrain dans le bassin de la rivière Jiu). *Clichés : Moroşanu, 2016 - 2018*

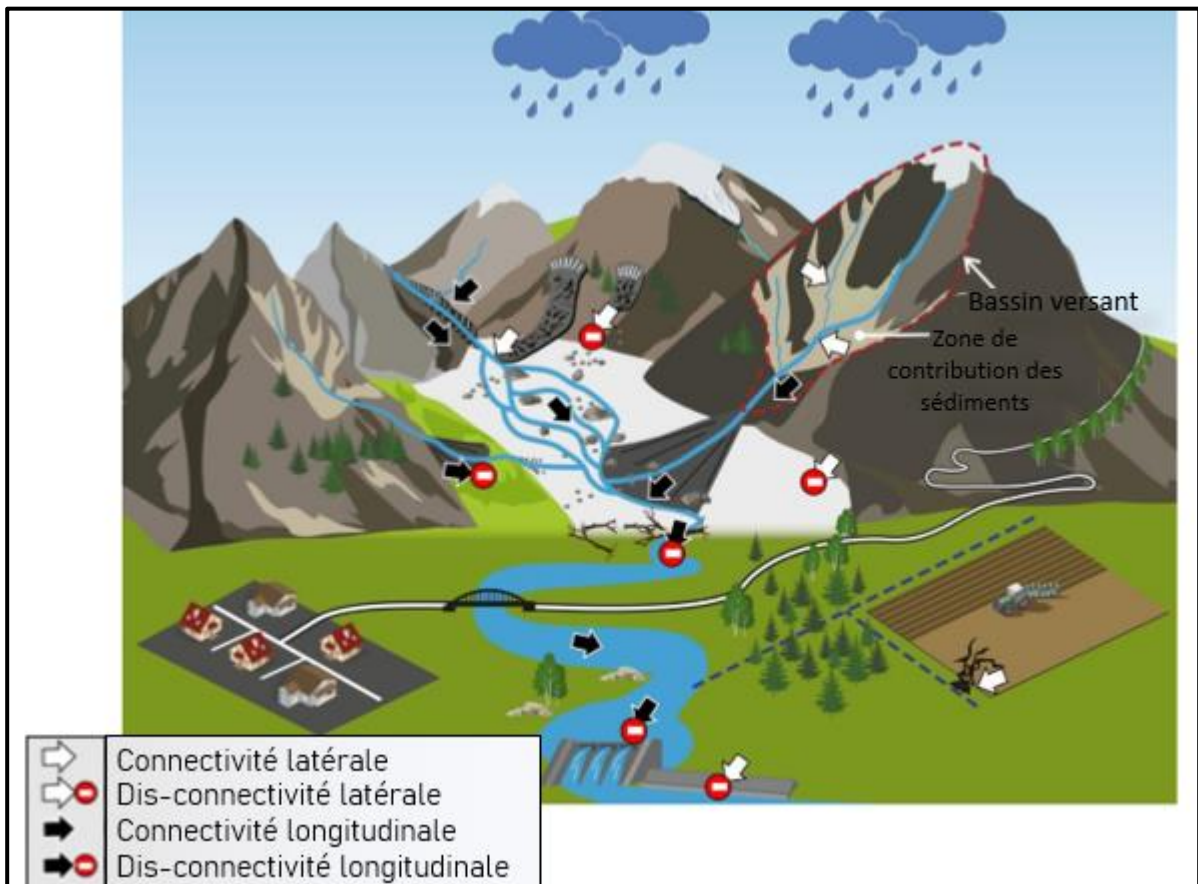
**Les zones tampon** sont des formes de relief qui limitent l'apport de sédiments dans les cours d'eau (i.e. piémonts, plaines alluviales, cônes alluviaux, zones humides) ; **les barrières** empêchent le mouvement des sédiments le long des vallées (i.e. vallées étroites, restes de la roche mère, dépôts grossiers de sédiments, débris de bois, des digues) et **les couvertures** recouvrent les surfaces des lits des rivières ou des plaines inondables, affectant la mobilité des sédiments (i.e. des dépôts fins de sédiments dans la plaine alluviale) [Fryirs *et al.*, 2007 ; Jain et Tandon, 2010 ; Fryirs, 2013]. Ces zones fonctionnent comme une série d'interrupteurs qui activent / désactivent les processus de distribution des sédiments, redéfinissant en permanence la zone de captage effective [Fryirs *et al.*, 2007 ; Fryirs, 2013]. C'est la raison pour laquelle nous considérons que toute



étude prenant en compte le lien entre les versants et les berges (en tant que source de sédiments), ou entre les versants et les lits de rivières (en tant que zones de transfert et de dépôt final) doit être faite avec prudence et avec l'investissement d'effort dans les investigations géomorphologiques précises sur le terrain (reconstruction de séquences d'évolution géomorphologiques, description des voies de transfert des sédiments et des possibles obstacles à l'écoulement et au transfert des sédiments).

#### 4.3.1.3. Comment quantifier la connectivité (hydro-)sédimentaire ou le besoin des indices ?

Ces dernières années, on a enregistré des nombreux progrès dans le développement des indices morphométriques [Borselli *et al.*, 2008; Cavalli *et al.*, 2013] et des modèles de simulation (par exemple Heckmann et Schwanghart 2012; Baartman *et al.* 2013) pour caractériser la dynamique sédimentaire au niveau spatial. En termes d'indicateurs de connectivité, Heckmann *et al.* (2018) fournissent une évaluation complète des indices de connectivité existants, en les différenciant selon les directions latérale et longitudinale, ainsi qu'en fonction de la connectivité fonctionnelle et structurelle (*Figure IV.28*).



**Figure IV.28.** Illustration schématique de la connectivité et de la dis-connectivité latérales (d'après Heckmann, 2018)

L'emploi des indices de connectivité est en première place vue en fonction de l'intérêt porté vers un problème dans le paysage étudié. Une évaluation des facteurs naturels et anthropiques qui peuvent améliorer la connectivité ou, par contre, installer une dis-connectivité latérale ou longitudinale dans le système fluvial doit toujours être faite avant toute utilisation des indices et modèles de connectivité sédimentaire. Les indices de

connectivité sont regardés en tant que moyens essentiels permettant de passer d'une évaluation qualitative à une évaluation (semi) quantitative du transfert des flux liquides et solides à travers les éléments constitutifs d'un système fluvial. Par comparaison à des disciplines étroitement liées telles que l'écologie et l'hydrologie, le développement des indices en géomorphologie n'a commencé que récemment et présente donc des opportunités et des défis qui méritent une attention particulière.

Le besoin d'analyser les systèmes anthropiques et les systèmes naturels dans une manière intégrée a conduit à des innovations dans le domaine des modèles théoriques de la connectivité gouvernant les systèmes couplés géomorphologiques et anthropiques et aussi dans le domaine des instruments intégratifs de modélisation et quantification de la connectivité [Zvoleff et An, 2014; Chin *et al.*, 2014; Harden *et al.*, 2014; Poepl *et al.*, 2016]. On souligne ici la nécessité de réaliser de nouvelles investigations de modélisation pour développer et valider sur le terrain les résultats des modèles de transfert amont – aval de la matière sédimentaire [European Sediment Network].

Afin de trouver un indice de connectivité pertinent à l'objectif fixé, un cadre conceptuel associant des propriétés structurales et fonctionnelles externes et systémiques (intrinsèques) du système fluvial doit être défini [Heckmann *et al.*, 2018]. Le paramètre le plus fréquent dont il faut tenir compte dans l'élaboration ou l'application des indices de connectivité hydro-sédimentaire est la distance de déplacement des sédiments, lorsqu'elle est combinée avec un paramètre d'entraînement reflétant la réponse en fréquence et en amplitude du système fluvial fournissant un modèle conceptuel cohérent pour la mise à l'échelle des prévisions d'érosion [Bracken *et al.*, 2014 ; Wohl, 2017].

L'analyse du volume des alluvions [Loghin, 2009], de la position et de l'aire de provenance jusqu'à la zone de dépôt ou de transit des sédiments dans les réservoirs [Marcu, 2014], ainsi que des processus de transfert des sédiments en différents environnements naturels et anthropiques [Cavalli *et al.*, 2013] a fait l'objet de nombreux débats sur le rôle déterminant de la connectivité pour la compréhension des processus hydro-sédimentaires dans les bassins versants [Bracke et Croke, 2007]. Une des caractéristiques les plus importantes des analyses de connectivité est la possibilité de suivre les changements de connectivité dans le temps, ce qui peut aider à étudier l'effet des perturbations naturelles et anthropiques sur les flux d'eau et de sédiments et les processus associés [Cossart *et al.*, 2018 ; Martini *et al.*, 2019 ; Llena *et al.*, 2019]. Dans les bassins de drainage correspondant aux réservoirs, la recherche des changements de la connectivité dans les systèmes fluviaux des sous-bassins versant appartenant aux systèmes de drainage des réservoirs a ainsi fait place à la notion de « *cascade de sédiments* » - "sédiment cascades" [Fryirs *et al.*, 2007] et le « *volume de passage* » - "Volume to breakthrough" [Bracken et Croke, 2007]. Cependant, la configuration des bassins versants et la nature de la connectivité au sein et entre les compartiments du paysage affectent le fonctionnement des cascades de sédiments et les réponses géomorphologiques à des perturbations d'ampleur et de fréquence différentes [Fryirs *et al.*, 2007]. De la sorte, les indices de connectivité représentent un cadre conceptuel efficace permettant de prédire comment une cascade de sédiments peut transmettre (ou non) une perturbation dans tout le système, y

compris des perturbations locales (présence des gravières, apport local de sédiments, éliminations de la matière liquide et solide d'un réservoir, etc.).

#### **4.3.1.4. La connectivité sédimentaire : quels enjeux ?**

L'étude de la connectivité sédimentaire en utilisant les techniques de la géomorphologie appliquée fait partie de l'analyse de la contribution des processus géomorphologiques à la genèse et au transfert des sédiments ("*sediment sources and delivery*") [Dumitriu *et al.*, 2016]. L'estimation du volume de matière transférée dans un bassin versant est de nature à vérifier des hypothèses qui découlent du principe de l'effet de domino : les processus actuels de modelage du terrain et les activités humaines (par exemple dans notre zone d'étude – l'extraction et le lavage du charbon) – intensification du transport des alluvions en suspension – accroissement le taux de sédimentation des rivières et des lacs [Zăvoianu *et al.*, 2010].

Des nombreux auteurs ont étudié des bassins versants des réservoirs affectés par le colmatage et ils ont réalisé des évaluations quantitatives et semi-quantitatives au niveau national/régional des processus et des mécanismes de transfert des sédiments [Ichim et Rădoane, 1987; Walling et Zhang, 2004; de Vente *et al.*, 2005; Theler *et al.*, 2010]. Le colmatage accéléré des réservoirs et les efforts déployés afin de maintenir leur fonctionnement ont déterminé un intérêt accru pour connaître et comprendre la réponse géomorphologique aux changements environnementaux à travers l'étude des sources d'alluvions et le transfert de sédiments à l'intérieur des bassins versants [Rădoane et Rădoane, 2005; Fryirs, 2013; Marcu, 2014; Bracken *et al.* 2015]. L'évaluation du volume de matériel qui arrive dans le réseau hydrographique ou dans un réservoir suppose l'identification des sources de sédiments à travers une analyse différentielle des types de processus géomorphologiques actuels et des activités anthropiques qui favorisent la formation de nouvelles alluvions [Zăvoianu *et al.*, 2010; Dumitriu *et al.*, 2016]. Dans beaucoup de bassins versant, les sources d'alluvions qui peuvent alimenter les réservoirs sont parfois concentrées dans des zones assez réduites, où les processus géomorphologiques présentent une intensité élevée à cause des activités industrielles, comme c'est le cas des activités liées à l'exploitation du charbon dans le bassin de la Jiu.

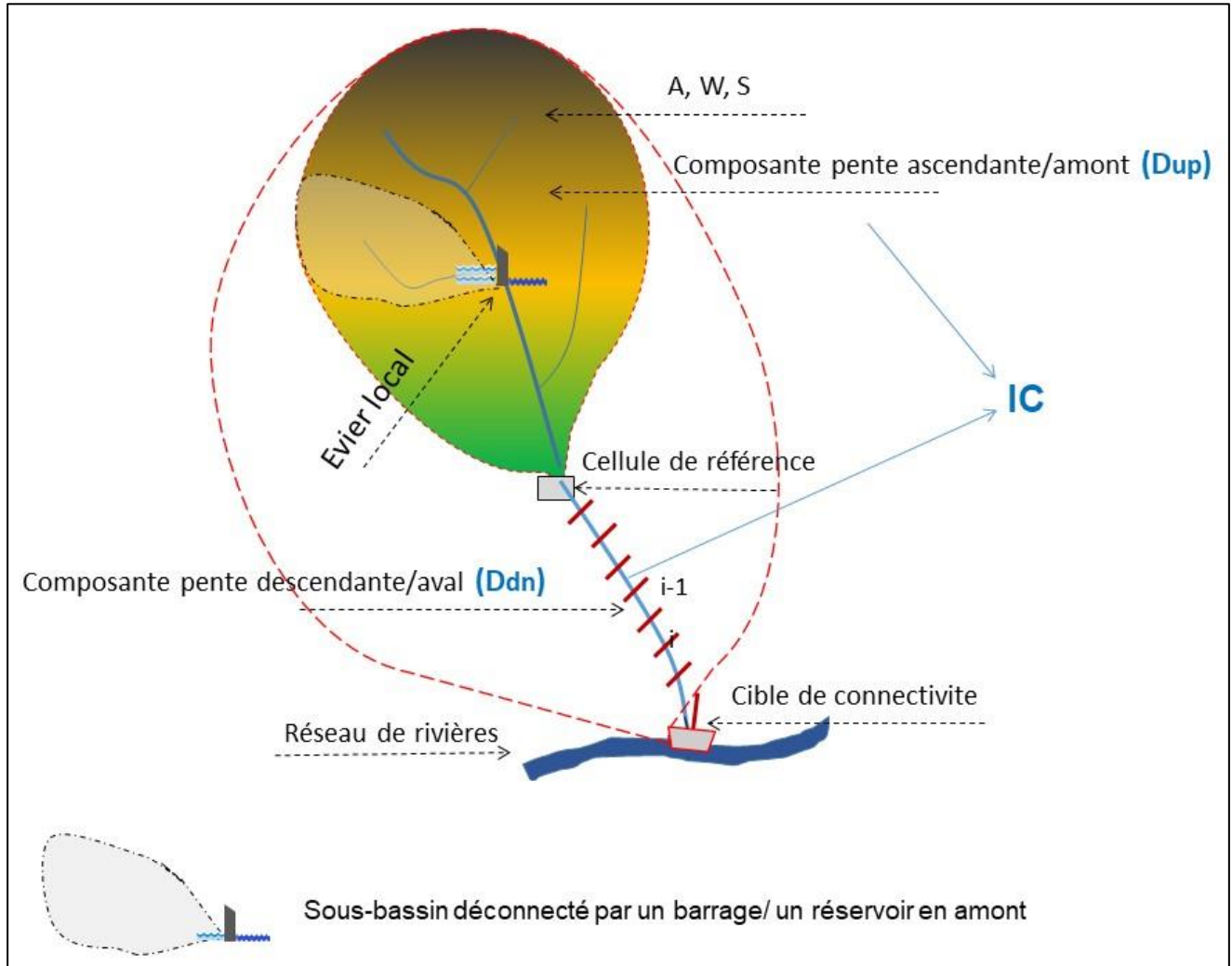
Dans ce contexte, l'étude de la connectivité sédimentaire que nous avons adoptée pour analyser le degré de connectivité entre les bassins d'exploitation du charbon (et pas seulement) et le réseau hydrographique est opportune et originale, en permettant de mettre en évidence l'effet des activités minières sur la genèse et le transfert des sédiments.

### **4.3.2. L'indice de connectivité : cadre conceptuel**

#### **4.3.2.1. Quel indice de connectivité pour analyser le transfert des matières sédimentaires ?**

Les indices de connectivité sont considérés comme un bon outil afin d'évaluer les facteurs responsables pour déclencher les phénomènes d'érosion, une condition nécessaire pour que les processus de transport et d'accumulation des sédiments se produisent [Cavalli *et al.* 2013]. Particulièrement pendant les grandes crues, des quantités importantes de sédiments peuvent être mises en mouvement par les versants et les berges, et ensuite transportées en aval.

Afin de caractériser la relation entre les zones sources potentielles des sédiments (le domaine des bassins versants) et les zones de transfert et de dépôt (les rivières), nous avons employé l'indice de connectivité le plus couramment utilisé celui proposé par Cavalli et ses collaborateurs [Cavalli *et al.*, 2013], modifié après Borselli *et al.* (2008). Le schéma conceptuel pour le calcul de l'indice de connectivité sédimentaire est présenté dans la *Figure IV.29*.



**Figure IV.29.** Le concept et les composantes pour le calcul de l'indice de connectivité (IC) [selon Borselli *et al.*, 2008 et Cavalli *et al.*, 2013]

L'indice de connectivité (IC) est calculé par les équations suivantes :

$$W = I - \left( \frac{RI}{RI_{MAX}} \right)$$

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (x_i - x_m)^2}{25}}$$

$$D_{up} = \overline{WS} \sqrt{A}$$

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d}{W_i S_i}$$

$$IC = \log_{10} \left( \frac{D_{up}}{D_{dn}} \right)$$

Les variables et les éléments utilisés dans le schéma de la connectivité (**Figure IV.29**) et dans les équations présentées ci-dessus sont :

- S – le gradient moyen de la pente pour la zone contributrice pente ascendante/amont ;
- A – la zone contributrice pente ascendante/amont (nombre de pixels) ;
- W – le facteur de pondération (impédance par rapport à l'écoulement) de la zone contributrice pente ascendante/amont ;
- RI – l'indice de rugosité ;
- $d_i$  – Longueur du chemin de l'écoulement au long de la cellule « i », en fonction de la direction descendante la plus abrupte ;
- i = nombre de la cellule ;
- $x_i$  – la valeur d'une cellule spécifique de la topographie résiduelle dans la fenêtre mouvante.
- $D_{up}$  – la composante amont ;
- $D_{dn}$  – la composante aval ;
- IC – l'indice de connectivité

En utilisant l'indice de connectivité (IC), nous allons essayer d'obtenir des informations portant sur : (i) les sous-systèmes fluviaux du bassin (ou les sous-bassins) de la rivière Jiu les plus connectés à la rivière principale ; (ii) l'existence ou non d'un découplage entre les zones sources des sédiments et les rivières suite aux interventions anthropiques sur les versants (l'exploitation du charbon ayant généré des formes de relief nouvelles, comme les carrières et les tas de stériles) et dans les lits fluviaux (la présence des réservoirs le long de la rivière Jiu).

L'analyse des sources potentielles des alluvions et de la connectivité sédimentaire dans le bassin de la rivière Jiu englobe une approche spatiale et temporelle multi-échelle, en évaluant le degré de connectivité à la rivière Jiu des différents sous-bassins, ainsi que leur sensibilité aux changements intervenus entre 1980 et 2016 dans les mécanismes de contrôle des flux sédimentaires (évolution du relief anthropique, changements dans la couverture et l'utilisation du terrain).

L'analyse de connectivité sédimentaire comportera plusieurs dimensions :

1. *L'analyse spatiale* : la caractérisation du degré de connectivité dans le bassin de la rivière Jiu à l'état actuel (sur la base du modèle numérique du terrain des années 2000), avec deux approches spatiales :
  - 1.1. À l'échelle du système entier du bassin de la rivière Jiu ;
  - 1.2. À l'échelle des sous-bassins versant principaux.
2. *L'analyse temporelle* : la comparaison de la connectivité sédimentaire entre l'année 1980 (illustrant la situation dans la période communiste, selon le modèle numérique qu'on a créé à partir de la carte topographique des années 1980 et le moment actuel, considéré génériquement comme la période d'après les années 2000) ;
3. *L'analyse fonctionnelle* : la mise en relation de la connectivité sédimentaire avec ses possibles effets dans la genèse et le transfert des sédiments, estimés par le modèle d'érosion des sols RUSLE.



#### 4.3.2.2. *Données utilisées dans le calcul de l'indice de connectivité et limites de l'analyse*

Afin de calculer l'indice de connectivité au niveau du bassin de la rivière Jiu, nous avons utilisé comme données de base **a)** la carte topographique (1 :25000) ; **b)** les modèles numériques du terrain (pour déduire les composants de l'indice et calculer le degré final de connectivité) et **c)** les photos aériennes.

*La carte topographique* est un outil essentiel dans la préparation du modèle numérique du terrain et dans la connaissance de la zone d'étude. Cela a été utilisé pour répondre à plusieurs objectifs :

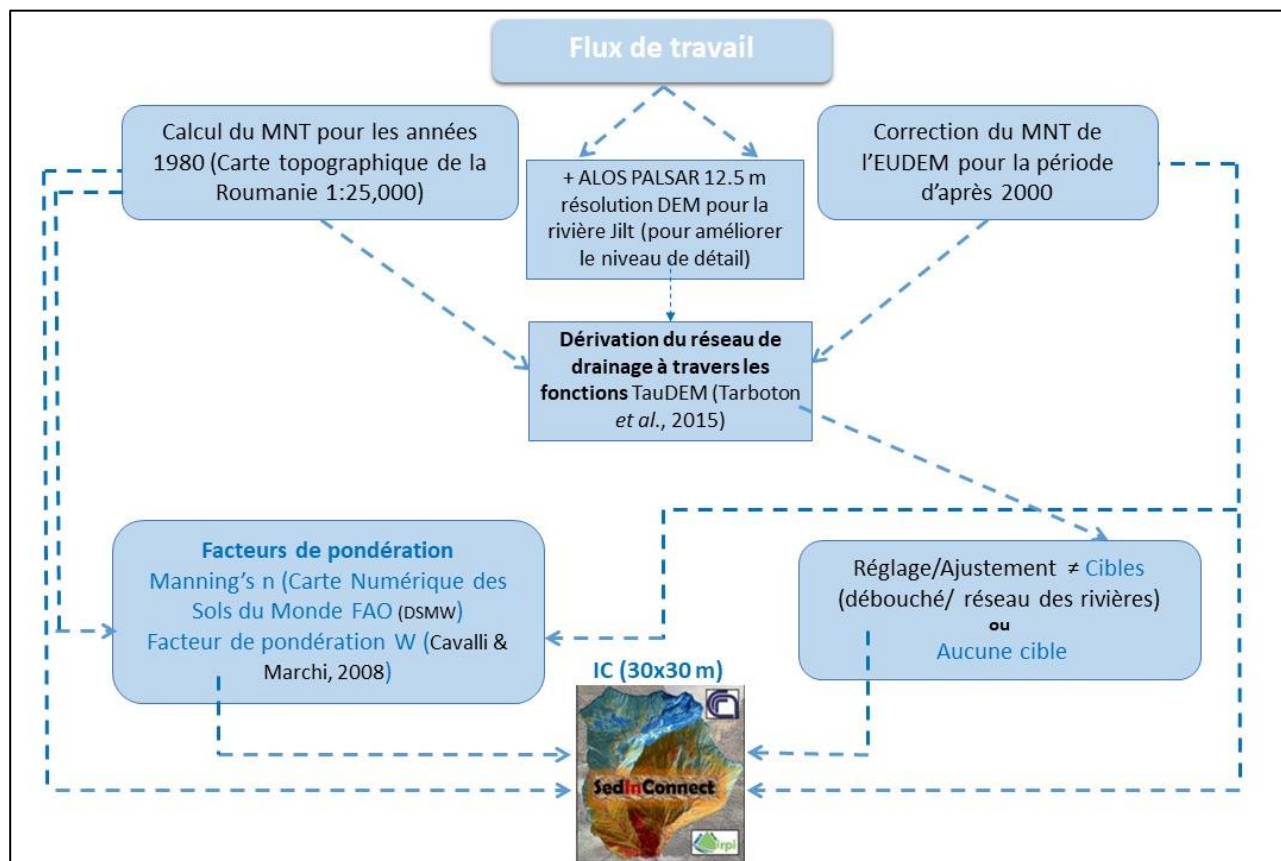
- (i) La numérisation des cotes altimétriques et le tracé automatique des courbes de niveau (la carte topographique datant de 1980, la situation du modèle numérique obtenu correspond à cette période);
- (ii) La vérification de la longueur du réseau hydrographique (plus précisément les points du profil longitudinal en amont sur des rivières, qui sont les plus proches des sources des cours d'eau) en comparant le réseau obtenu automatiquement en environnement SIG avec celui tracé sur la carte topographique ;
- (iii) La délimitation de la ligne de partage des eaux des sous-bassins hydrographiques pour lesquels un indice de connectivité global sera dérivé.

*Les modèles numériques de terrain* sont les outils les plus importants pour calculer l'indice de connectivité. En fonction de leur résolution, du niveau de détail morphométrique et de leur degré d'actualité, ils doivent être autant que possible capables de représenter les caractéristiques essentielles d'un bassin hydrographique sans lesquelles il est difficile, voire erroné, d'analyser la connectivité: l'hétérogénéité de la surface d'un bassin, les voies de drainage et les lignes de plus forte pente, les altitudes réelles résultant des changements dans le relief (érosion et déplacements en masse, excavations, remblais, présence des tas de stériles). Nous avons utilisé trois modèles numériques de terrain : a) le premier a été créé à partir de la carte topographique de 1980 (25 m de résolution spatiale), pour illustrer la connectivité dans le passé ; b) le deuxième et le troisième sont des modèles numériques du terrain plus récents, disponibles sur des portails internationaux à la base des missions satellitaires : le plus important est le modèle numérique EU DEM (30 m de résolution spatiale), illustrant l'état morphologique actuel (les années après 2000) et le deuxième est le modèle numérique de terrain ALOS Palsar (résolution de 12,5 m) qui, ne couvrant pas tout le territoire du bassin de la Jiu, a été utilisé seulement pour détailler le relief du sous-bassin de la Jił.

*Les photos aériennes* (couvrant une période entre 2004 et 2017, selon leur disponibilité sur Google Earth et sur le portail de l'ANCPI) ont été utilisées pour un double objectif : (i) délimiter certains éléments artificiels pouvant se constituer dans des obstacles, même des zones de discontinuité totale pour le transfert des flux sédimentaires (les grands réservoirs) et (ii) vérifier, autant que le permet l'espace de travail, certains secteurs plus ou moins connectés en fonction des résultats de l'indice de connectivité utilisé.

### 4.3.3. Méthodologie de calcul de l'indice de connectivité adaptée à la problématique du bassin de la rivière Jiu

Le flux de travail est présenté dans la **Figure IV.30**, qui montre les pas suivis pour calculer l'indice de connectivité selon la méthode de proposé par *Cavalli et al. (2013)* et *Crema et al. (2015)*, modifié après l'indice de *Borselli et al. (2008)*. La préparation des données numériques de terrain, ainsi que les informations spatiales dérivées a été faite dans le logiciel ArcGIS 10.4.1., tandis que le calcul final de la connectivité et la dérivation des cartes des facteurs associés ont été exécutés dans l'application standalone « SedInConnect », créée par Crema S. et son équipe.



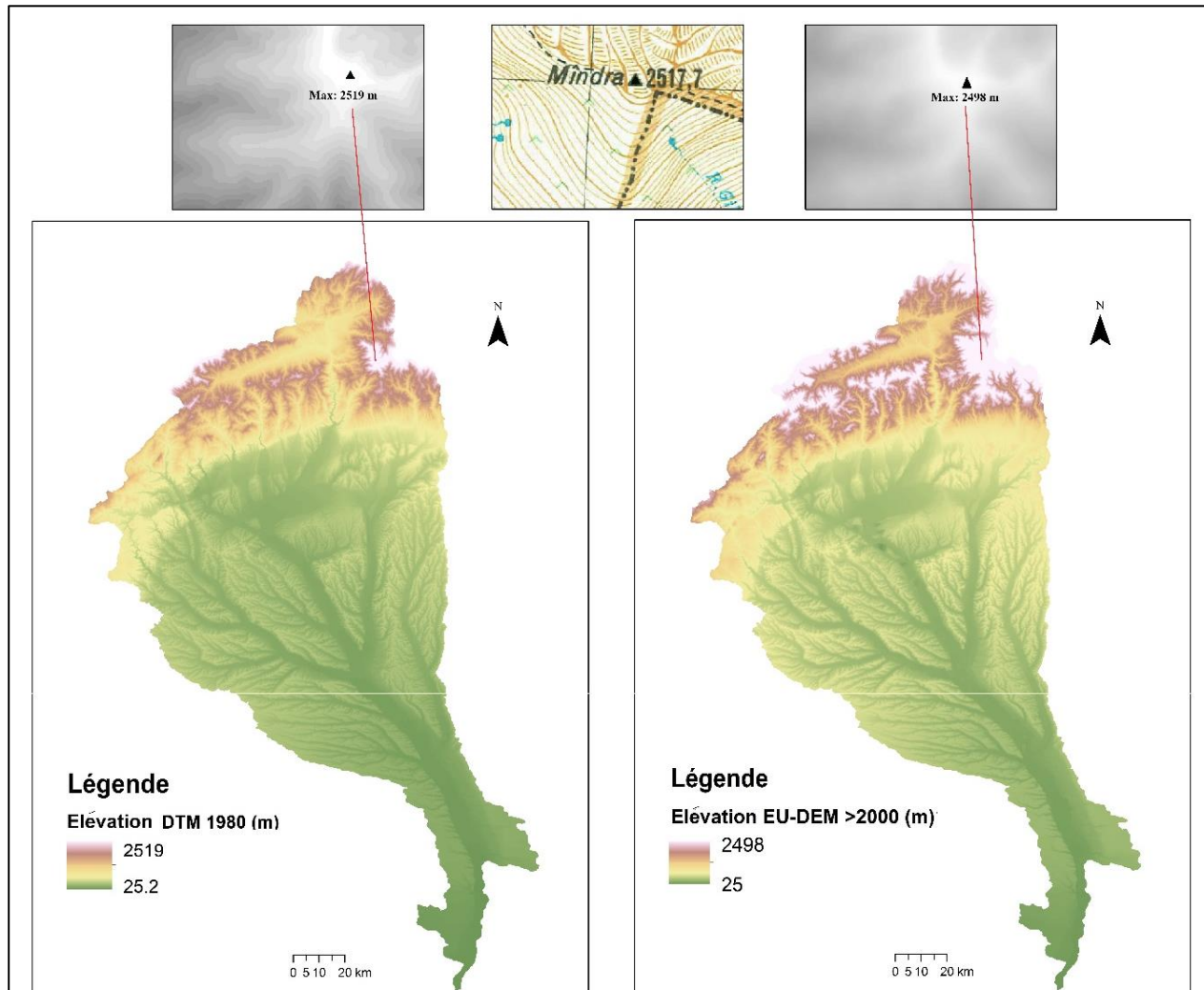
**Figure IV.30.** Le schéma des étapes de calcul de l'indice de connectivité (IC)

#### 4.3.3.1. La construction des modèles numériques de terrain

L'analyse du degré de connectivité a été réalisée pour expliquer le couplage longitudinal entre les sous-bassins contributeurs et les rivières principales. Cette analyse est basée sur l'indice de Cavalli et ses collaborateurs pour la connectivité à l'échelle de l'ensemble du bassin de la rivière Jiu [*Cavalli et al. 2013*].

Le calcul de la connectivité a été mis en œuvre à partir des modèles numériques d'altitude de 1980 et des années après 2000. Le modèle numérique de terrain (MNT) de 1980 a été obtenu en intégrant l'information altitudinale tirée des courbes de niveau (dérivées automatiquement) et de plus de 1700 cotes altimétriques (dérivées manuellement) de la carte topographique de la Roumanie (1 :25000), avec la commande *topo to raster* en milieu SIG.

Pour la période d'après 2000, nous avons utilisé un modèle numérique d'élévation (DEM) EU-DEM v1.0 (>2000) créé au sein de l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) pour les pays membres représentant la première surface couverte par les capteurs satellitaires au niveau de l'Europe. C'est un produit hybride basé sur les données SRTM et ASTER GDEM, fusionnées selon une approche de moyenne pondérée ([Copernicus Land Monitoring](#)) - *Figure IV.31*.

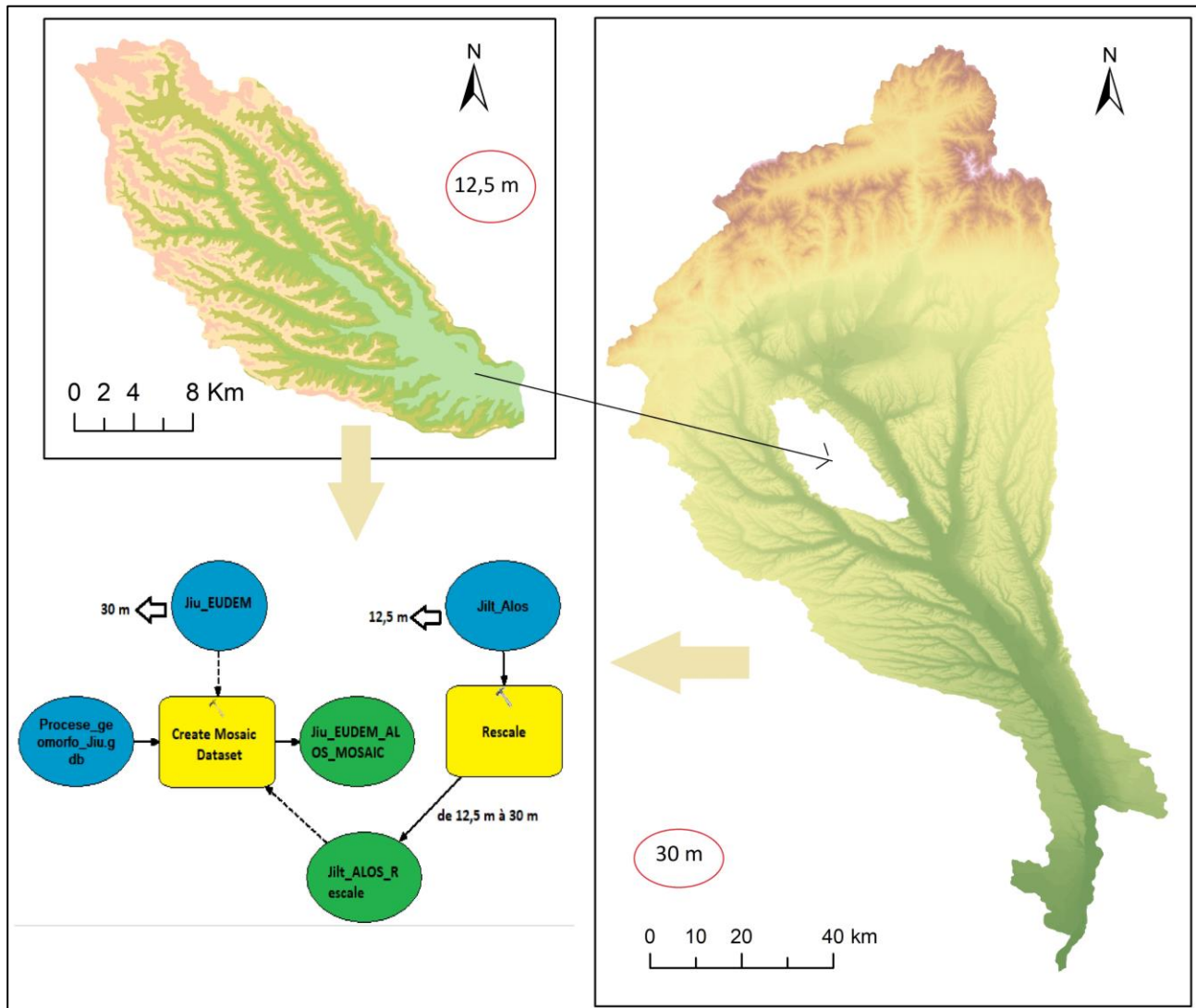


**Figure IV.31.** La comparaison entre les deux modèles altitudinaux utilisés

Les données ont été recueillies de février 2003 à octobre 2009 au cours de longues périodes d'observation d'un mois, trois fois par an jusqu'en 2006 et deux fois par an par la suite [[AEE, 2014](#)]. La validation statistique de EU-DEM v1.0 assure une précision verticale globale (-0,56 m) de 2,9 mètres RMSE [[AEE, 2014](#)]. Le modèle EU-DEM a une résolution spatiale de 30x30m. La version que nous avons utilisée ne bénéficie pas des corrections suivantes apportées à EU-DEM v1.1: la correction systématique des problèmes de géolocalisation ; le criblage et l'enlèvement d'objets, y compris la présence des anomalies négatives ou positives dans l'élévation; la détection et la correction de plus de 75 000 artefacts; la cohérence avec la version mise à niveau de EU-Hydro afin de produire une meilleure topologie de réseau fluvial [[Copernicus Land Monitoring](#)]. C'est peut-être la raison pour laquelle, si nous comparons les deux MNT / DEM, nous pouvons

constater d'importantes différences d'altitude à certains endroits, notamment en ce qui concerne les changements (perte du terrain ou l'apparition du relief artificiel à cause de l'industrie minière) ou les valeurs extrêmes (le sommet le plus haut est de 2518 m, comme le montre le MNT de 1980 en fonction des informations topographiques fournies en tant qu'entrée du modèle, alors que sur le EU-DEM, l'altitude maximale dans le bassin de la rivière Jiu n'atteint que 2498 m). Sur la nous pouvons comparer les deux modèles numériques altitudinaux.

Notre intérêt majeur portant sur le rôle joué par les formes de relief anthropiques des zones minières dans la mise en mouvement des sédiments (ayant comme élément central le bassin de la rivière Jilț), nous avons utilisé comme limites spatiales deux groupes de modèles numériques de terrain (**Figure IV.32**):



**Figure IV.32.** Le schéma de mosaïquage des deux modèles numériques de terrain (ALOS Palsar pour le bassin de la rivière Jilț et EU-DEM pour le reste du bassin de la Jiu)

I/ celui des deux situations de 1980 et 2000 à une résolution spatiale plus grossière (de 30m) ;

2/ celui d'un troisième modèle numérique de terrain créé lors de la mission satellitaire de ALOS Palsar<sup>20</sup> (en 2007), à une meilleure résolution de 12,5 m. Ainsi, pour la situation d'après 2000, notre modèle numérique final a été obtenu sous la forme d'une mosaïque des deux modèles de résolutions différentes : celui de ALOS PALSAR de 2007 (à 12,5m) pour le bassin de la rivière Jilț et celui de EU-DEM (de 30 m résolution spatiale), pour le reste du bassin versant de la rivière Jiu à une résolution de 30x30 m.

Étant donné que les différences d'altitude peuvent être dues à la fois à la source des données (topographiques et satellites) et à leur traitement différent, mais aussi aux changements réels survenus dans la répartition des altitudes dans les zones à relief anthropique (interventions sur le relief et les carrières de charbon, ainsi qu'au niveau des lits de rivières), la méthode du "DEM of Difference" (DoD) a été appliquée pour mettre en évidence les zones présentant des changements d'altitude dus aux facteurs naturels (ajustements des lits des rivières) ou anthropiques (disparition et apparition du relief anthropique). La méthodologie suivie est conforme à celle recommandée par les auteurs du logiciel "Geomorphic Change Detection" (GCD), qui fonctionne idéalement sur la base d'algorithmes appliqués au même type de modèles numériques de terrain [Bengen *et al.*, 2014]. Le logiciel GCD a été développé principalement pour la détection de changements topographiques dans les rivières, basée sur le raster de deux surfaces quelconques. La variation volumétrique du stockage est calculée à partir de la différence d'élévation de la surface obtenue à l'aide de modèles numériques de terrain (MNT) dérivés de relevés topographiques répétés [Wheaton *et al.*, 2010]. Dans notre cas, les deux modèles altitudinaux ont été analysés avec prudence, étant donné l'origine différente des données d'entrée (les informations brutes sur la variation spatiale des altitudes) et les différentes méthodes de réalisation des modèles, ainsi que la période relativement longue entre les deux modèles de terrain (1980, pour le DTM de 1980) et (les années 2000, pour les modèles EU-DEM et ALOS Palsar d'après les années 2000). Partant de l'hypothèse que les deux MNT utilisés ont une représentation de surface incertaine, nous avons détecté les changements entre les années '80 et 2000, en utilisant le logiciel de détection des changements géomorphologiques décrit par les équipes de Wheaton et Brasington [Brasington *et al.*, 2001 ; Brasington *et al.*, 2003]. Pour cela, nous avons calculé un paramètre de différence entre chaque pixel d'élévation des deux modèles numériques ( $\delta E$ ):

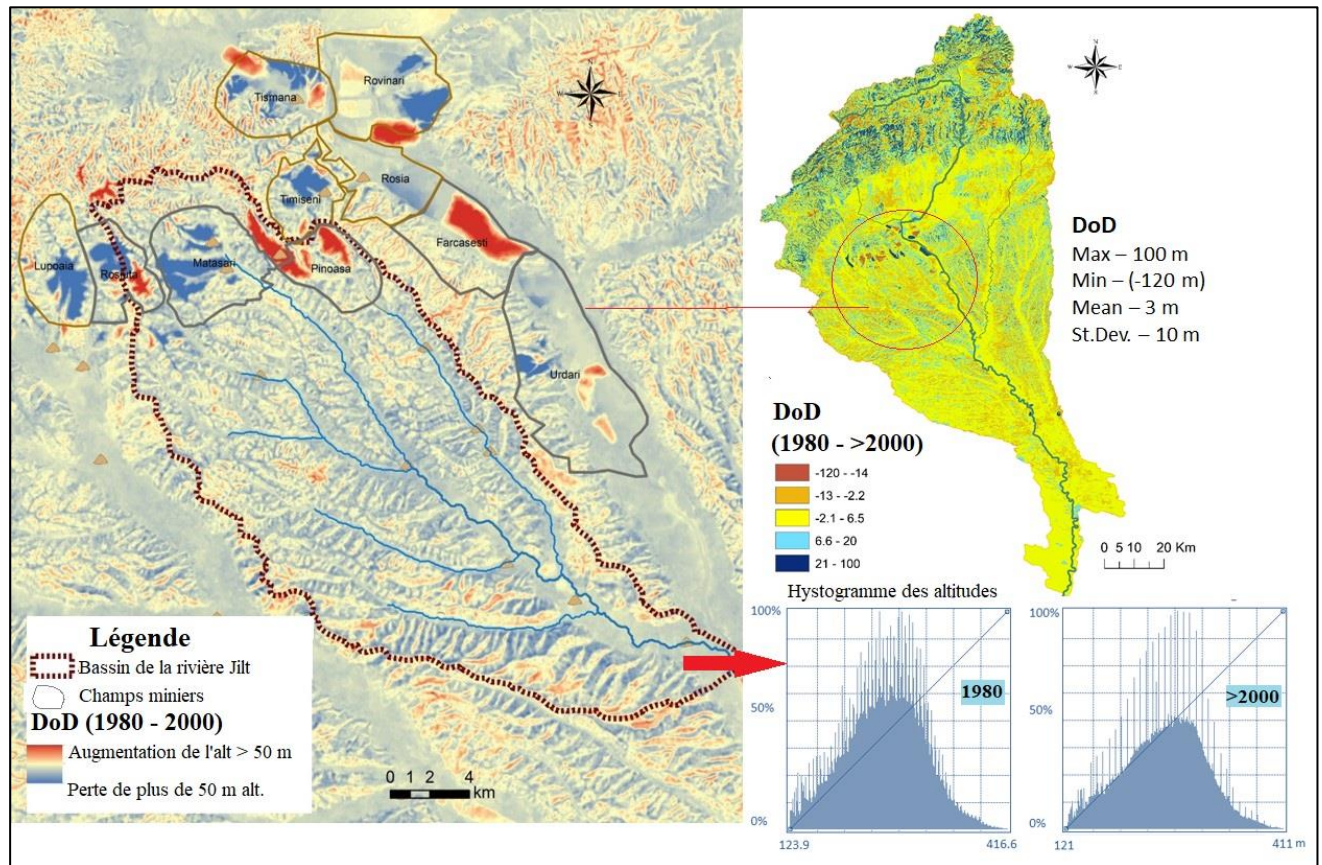
$$\delta E = Z_2 - Z_1$$

où  $\delta E$  est un DEM dont l'altitude est altérée,  $Z_1$  est l'altitude dérivée du DEM antérieur (dans notre cas, le DTM de 1980) et  $Z_2$  est l'altitude dérivée du DEM ultérieur (les modèles DEM de 2000). En sommant le changement total du  $\delta E$ , nous pouvons quantifier aussi la différence volumétrique totale, qui peut être négative ou positive à cause des processus d'érosion et de dépôt, comme le montre le zoom sur le bassin de la rivière Jilț sur notre carte DoD obtenue (*Figure IV.33*).

---

<sup>20</sup> Pour plus d'information sur les missions ALOS Palsar et le type de produits, veuillez visiter le site : [www.alospalsar.eu](http://www.alospalsar.eu)





**Figure IV.33.** Les changements altimétriques (DoD) entre 1980 et après 2000 pour le bassin de la rivière Jiu (à droite en haut) et pour le bassin de la rivière Jilț (à gauche et en bas de la partie droite)

Nous observons que les plus grandes différences d'altitude ont concerné le secteur supérieur du bassin de la rivière Jilț, où des modifications dans le relief ont eu lieu à cause de l'activité minière qui a conduit à l'apparition de nouveaux tas de stériles ou le creusement plus en profondeur dans les carrières de charbon à ciel ouvert. Cette différence altimétrique doit certainement se traduire en un changement du degré de connectivité sédimentaire.

La procédure de traitement ultérieure de deux modèles numériques de terrain de 1980 et d'après 2000 2016 a consisté dans la succession d'opérations suivantes :

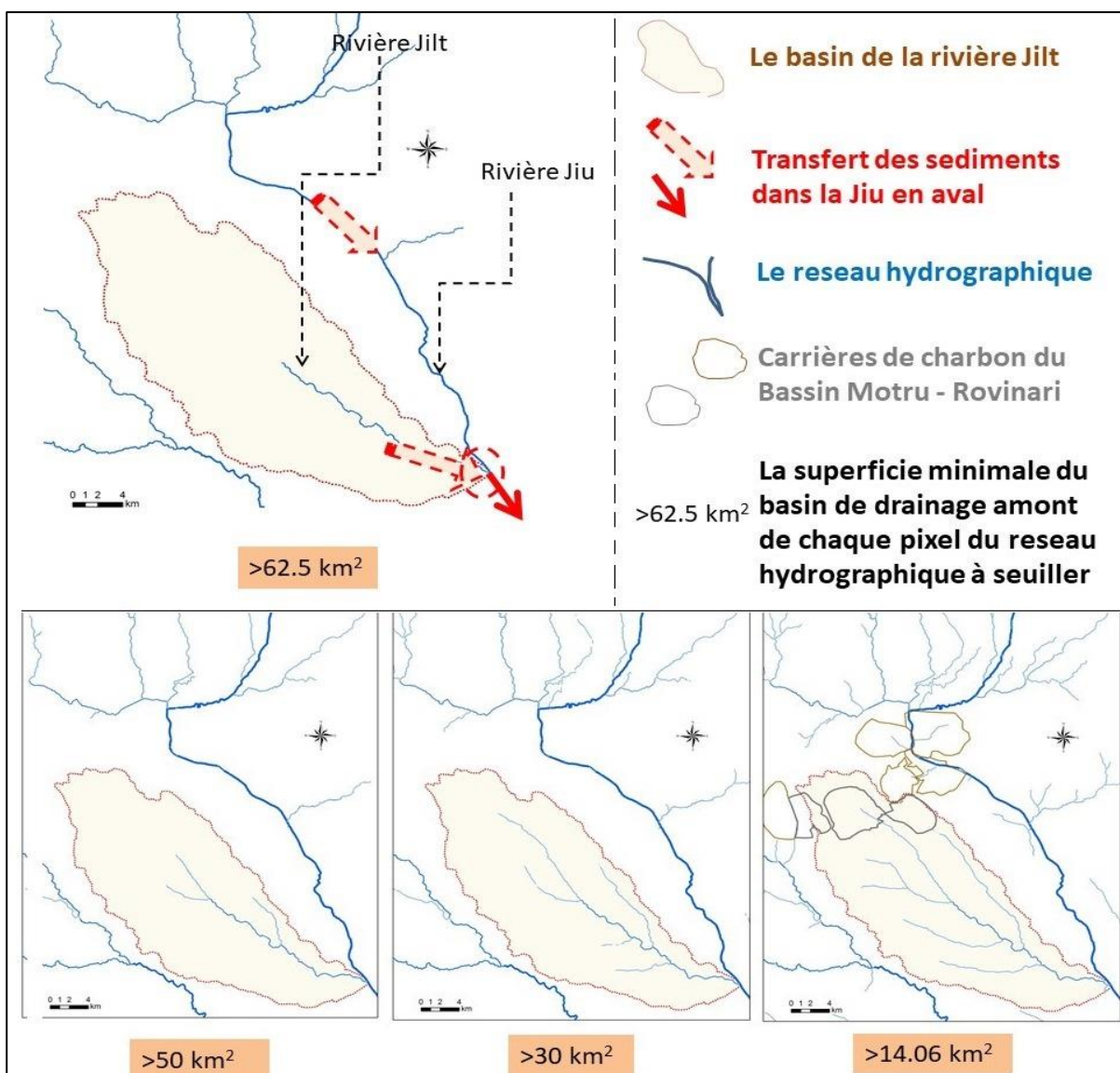
- Le remplissage des cuvettes (*pit removal*) des modèles altitudinaux ;
- La conversion des valeurs de chaque pixel d'altitude de 9 décimales numériques en 4 décimales numériques pour faciliter les calculs en format raster;
- La dérivation du réseau hydrographique à partir de la carte d'orientation de l'écoulement par le calcul de la zone de contribution à l'aide de méthodes de détermination de la direction de l'écoulement.

Tous ces pas ont été parcourus en milieu SIG en utilisant les fonctions de l'outil TauDEM (créées pour l'analyse des MNT hydrologiquement conditionnés (cuvettes supprimées) à la base des résultats des calculs de la direction d'écoulement et des pentes dérivées des modèles numériques altitudinaux (dans le module Stream Network Analysis) [Tarboton et Baker, 2008 ; Tarboton et al., 2009]. Nous avons opté pour la méthode « D-infinity » pour la définition du réseau hydrographique et de la direction d'écoulement [Tarboton, 1997].

#### 4.3.3.2. La délimitation du réseau hydrographique

La délimitation du réseau hydrographique a été un pas clé dans la préparation des données cartographiques en vue de l'analyse de connectivité. Le fait que le réseau hydrographique est représenté sur les cartes topographiques par les lignes bleues tracées de façon plus au moins empirique peut constituer un obstacle dans la mise en route d'un modèle de connectivité dépendant du bon choix d'un tel réseau. Afin de s'affranchir de cette source d'erreur introduite lorsqu'on se contente à vectoriser le réseau hydrographique selon une carte topographique ou même selon une image aérienne, il est recommandé à respecter le critère d'extraction automatique du réseau hydrographique à partir du modèle altitudinal [Depractere, 1990].

La méthode le plus communément utilisée dans ce but est d'établir les seuils de la surface drainée en amont la cellule « source » du réseau hydrographique. Cela se fait par le seuillage du réseau hydrographique à partir du MNT en fonction du critère de surface drainée par les pixels du réseau hydrographique (*Figure IV.34*).



**Figure IV.34.** Le seuillage du réseau hydrographique en fonction de la proximité des objectifs miniers dans le bassin versant de la Jiu. Les seuils choisis à représenter sont correspondent aux valeurs maximales, minimale et aux deux des valeurs intermédiaires de la superficie de drainage amont des pixels considérés sources du réseau à chaque essai

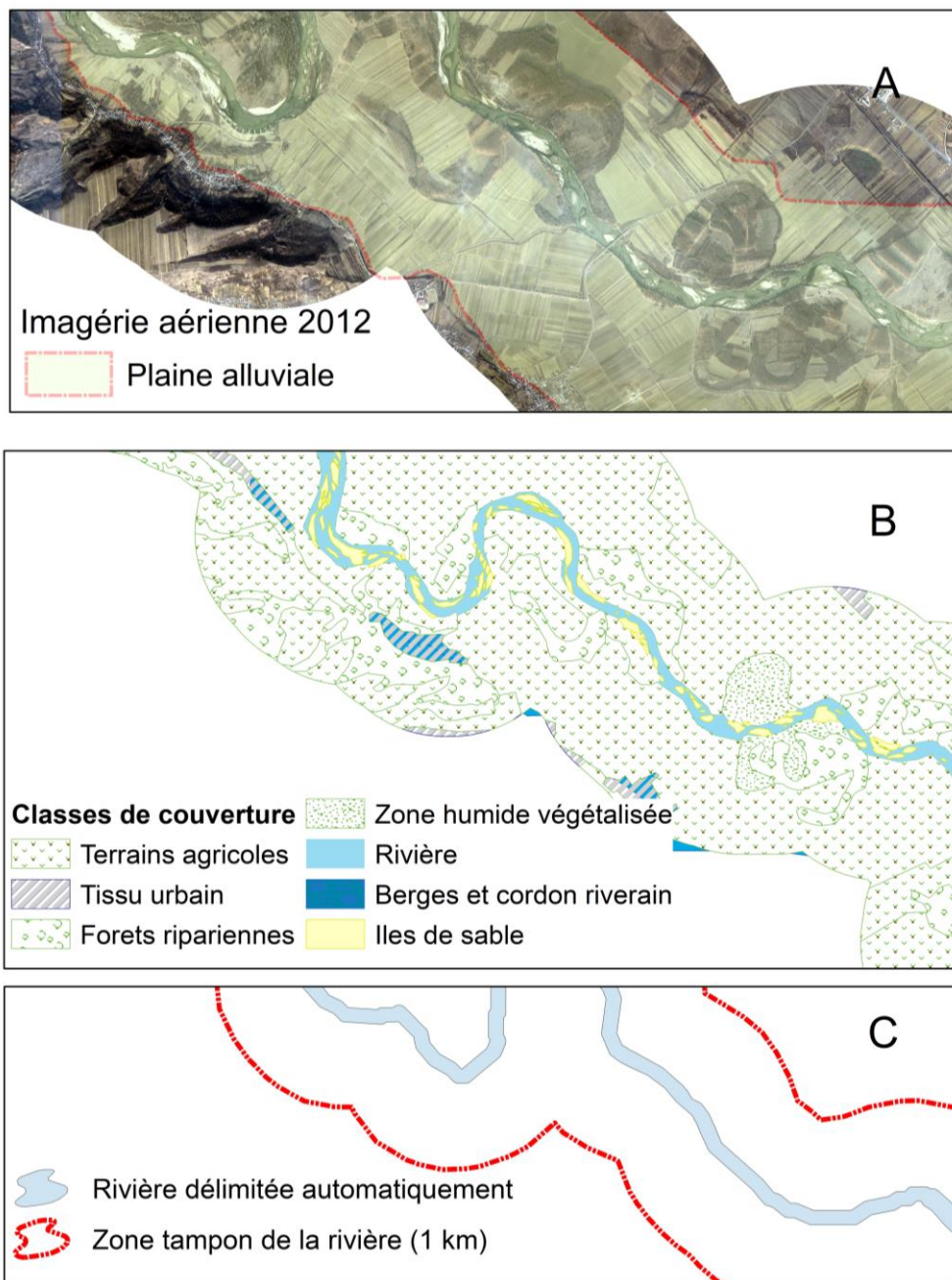
Les sources des rivières sont fréquemment localisées dans des zones où l'érosion est forte et où les sédiments peuvent se former. L'intérêt d'aller le plus loin possible vers ces sources des rivières est porté par la présence du relief anthropique (des tas de stériles miniers et des carrières). Afin de capturer les secteurs des sources des rivières s'écoulant en aval des carrières de charbon (typiquement les affluents de la rivière Jilț dans le bassin Motru – Rovinari), la définition du réseau hydrographique a été faite de manière graduelle en fonction de la longueur des rivières dans le bassin de la Jilț, en diminuant la surface de drainage minimale correspondante à chaque pixel des rivières. Ainsi, nous avons commencé avec une superficie de 100000 pixels (62,5 km<sup>2</sup>) en amont du dernier pixel du réseau hydrographique qu'on a voulu tracer et on l'a diminué, au fur et à mesure qu'on a prolongé le réseau vers l'amont, pour que les sources des rivières seuillées automatiquement soient le plus proche possible des vraies sources des petits affluents de la Jilț, dans la proximité des carrières de charbon. La superficie finale qu'on a considérée reproduisant le plus fidèlement la longueur du réseau hydrographique jusqu'aux zones sources sur les pentes extérieures des carrières de charbon et dans la proximité des tas de stériles a été de 14,06 km<sup>2</sup> (équivalent à 22496 pixels). Le format du réseau hydrographique est initialement obtenu en raster, alors qu'on a eu besoin de ceci en format vecteur. Pour cela, une opération de conversion raster – vecteur sur la base de la classification des pixels (0 – les pixels non appartenant au réseau ; 1 – les pixels du réseau) a été appliquée.

Une fois défini le réseau hydrographique, nous avons procédé à la création des zones tampon (*buffering*) le long des rivières. C'est une étape clé dans la préparation des données spatiales pour l'analyse de connectivité, puisque le logiciel « SedInConnect » fonctionne selon un algorithme qui n'accepte pas des éléments cible (rivières ou réservoirs) représentés sous la forme de point ou ligne [Crema *et al.*, 2015]. Les zones tampons doivent reproduire l'extension d'un des obstacles au transfert des sédiments, qu'on vient de mentionner ci-dessus et elles doivent couvrir les plaines alluviales, qui fonctionnent comme des zones de stockage et transfert lent des sédiments [Fryirs *et al.*, 2007]. Etant donné que l'extension réelle d'une plaine alluviale est difficile à délimiter, avec des largeurs assez variables à chaque secteur de rivière (en fonction des caractéristiques morphométriques), nous avons utilisé un critère automatique de définition de la largeur de cette zone tampon, en mesurant sur la carte topographique et sur les images aériennes l'extension de la plaine d'inondation et en vérifiant pour quelques-unes leur extension pendant des grandes crues avec les photographies aériennes (**Figure IV.35**). En général, plus la rivière était courte, moins étendue sera la zone tampon et pour donner un ordre de grandeur, nous nous sommes rapportés à la longueur de la rivière, inscrite sur la table des attributs des rivières extraites de la carte topographique, qu'on a superposés avec le réseau hydrographique obtenue en milieu SIG par seuillage.

Pour chaque rivière, la largeur de la zone tampon a été obtenue avec un facteur de multiplication en fonction de la longueur totale des rivières (inscrite dans le tableau d'attributs) qui, pour raisons de simplification, n'a pas pris en compte la longueur des différents secteurs des rivières, sinon une valeur unique de la longueur finale de chaque rivière (même si en amont, les plaines alluviales sont moins développées, voire parfois inexistantes dans les secteurs de montagne). On s'est ainsi assuré que le réseau hydrographique est



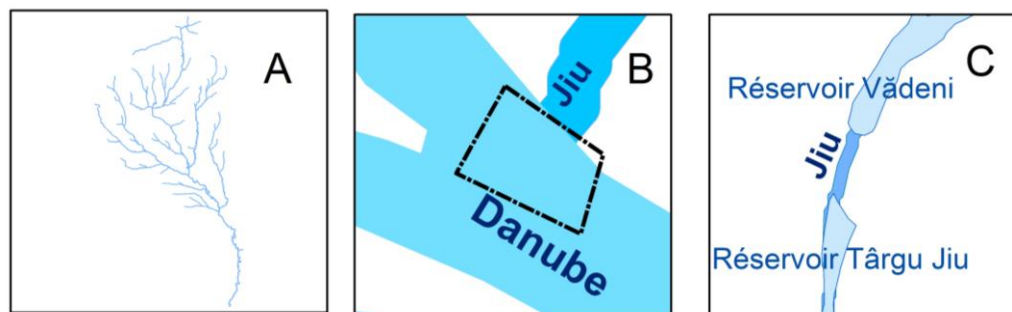
encadré d'une zone tampon suffisamment étendue pour prendre en compte les éventuels éléments supplémentaires (des digues, des forêts ripariennes, des terrasses basses) qui pourraient se comporter comme zones de ralentissement de l'écoulement et transfert de matières. Finalement, la largeur de la zone tampon a varié de 5 m à 200 m, en fonction de l'importance de la rivière.



**Figure IV.35.** L'extension de la zone tampon le long d'un secteur de rivière (la rivière Jiu entre Răcari et Podari), selon différentes sources cartographiques : **A.** Réseau hydrographique et plaine alluviale délimités manuellement sur une image aérienne de 2012 ; **B.** Les catégories hydrauliques de couverture du sol selon la carte topographique et l'image aérienne de 2012 ; **C.** Réseau hydrographique seuillé, avec une zone tampon délimité automatiquement sur le modèle numérique altitudinal

Le réseau hydrographique a constitué donc un des éléments cible en fonction duquel la connectivité a été calculée. Le deuxième élément qu'on a utilisé comme référence spatiale du calcul de la connectivité est

l'embouchure de la rivière Jiu, représentée pour raisons techniques comme polygone. Le troisième élément est le réservoir Vădeni à Târgu Jiu, qui représente un obstacle à la connectivité, en découpant le transfert de sédiments amont – aval partiellement ou (*Figure IV.36*). Les cartes de connectivité ont été réalisées alternativement pour chacune des trois situations. Le logiciel SedInConnect n'est pas techniquement adapté pour calculer le degré de connectivité entre les zones sources de l'amont et plus d'un élément de référence aval (comme par exemple, si l'on considère comme élément cible à la fois le réseau hydrographique et l'embouchure).



**Figure IV.36.** Les éléments hydrographiques cibles pour le calcul de la connectivité : A. Le réseau hydrographique seillé avec la zone tampon ; B. l'embouchure de la rivière Jiu dans le Danube ; C. La considération du polygone autour du réservoir Vădeni

Il faut mentionner que l'algorithme de la connectivité, au moins dans la phase de développement actuel, ne considère pas un obstacle/ élément de découplage de façon partielle. Cela signifie que si un élément cible de type réservoir est considéré, la carte finale de connectivité montrera uniquement la partie du bassin versant en aval du bassin de drainage du réservoir. Tout ce qui est en amont du réservoir est considéré une zone découplée du reste, la connectivité n'étant pas calculée. On va montrer plus tard un résultat de ce type d'approche.

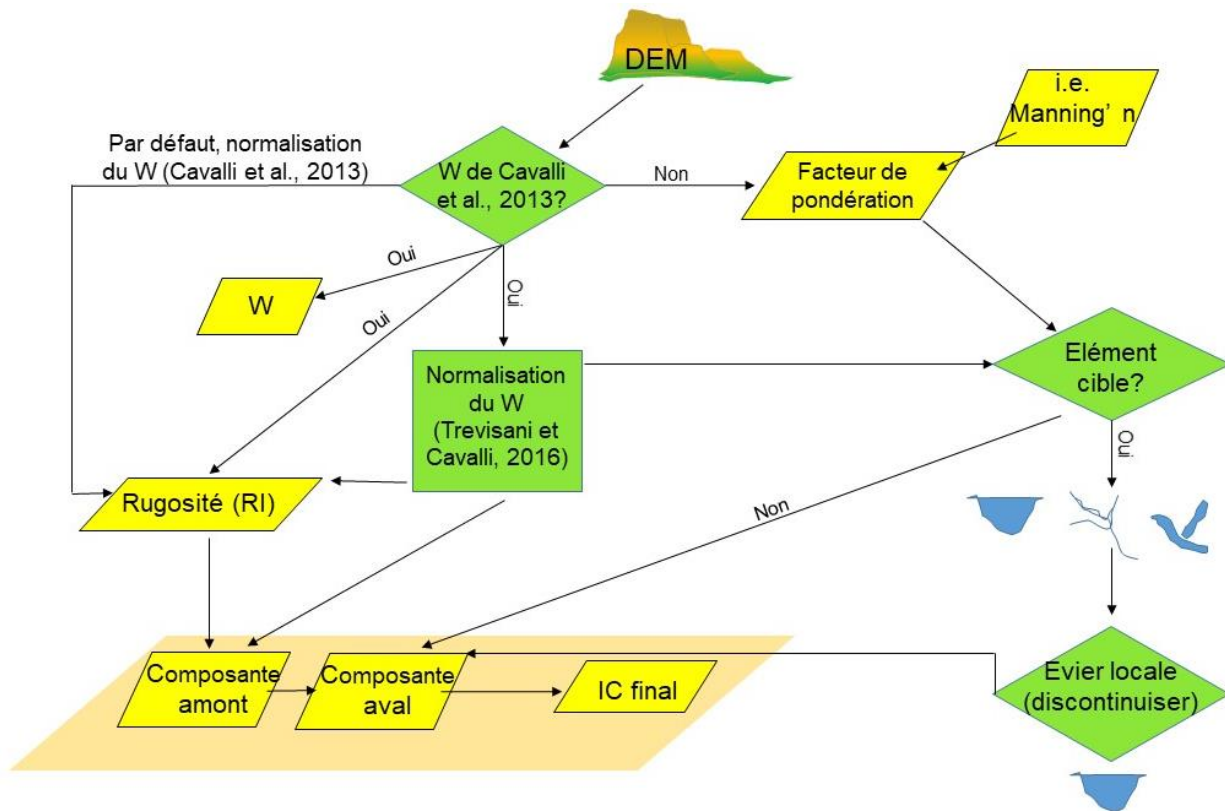
#### 4.3.3.3. La rugosité du terrain

Le pas suivant a été de créer ou générer automatiquement les cartes du **facteur de pondération** (*angl*, « Weight factor ») et de l'indice de rugosité topographique (*angl*, « Roughness factor »), considérés essentiels pour exprimer l'impédance (l'opposition du terrain ou des éléments de couverture du sol) à l'écoulement ou transfert des sédiments [Cavalli *et al.*, 2013]. On va se référer à la carte du « Weight factor » comme « W » et à la carte de l'indice de rugosité comme « RI ». Les deux cartes peuvent être obtenues à partir de différentes sources (*Figure IV.37*) :

- Le calcul automatique, directement dans le logiciel SedInConnect utilise comme donnée d'entrée le modèle numérique de terrain hydrologiquement corrigé (éviers remplis) pour dériver les cartes du facteur W (selon la méthode de Cavalli et Marchi, 2008) et de l'indice RI.
- Le calcul semi-automatique implique l'utilisation d'une des cartes précédemment réalisées dans un autre environnement SIG. Nous avons essayé cette approche pour exprimer le facteur W de façon plus proche de la réalité sur le terrain, en le remplaçant avec la spatialisation des valeurs de l'indice « n » de



Manning. Cela peut être calculé soit en utilisant l’approche hydraulique (si on mesure sur le terrain la texture de chaque classe d’occupation / couverture du sol, dans le cas où on s’intéresse via l’analyse de connectivité à un bassin versant petit qui permet des mesures et calibrations sur le terrain), soit l’approche physiographique – pédologique, en utilisant les classes des unités de sol de FAO. Le facteur W peut être utilisé avec les valeurs brutes ou normalisées, selon la méthode décrite par [Trevisani et Cavalli \(2016\)](#).



**Figure IV.37.** Le schéma de calcul des facteurs de pondération pour l’impédance topographique (RI) et l’IC

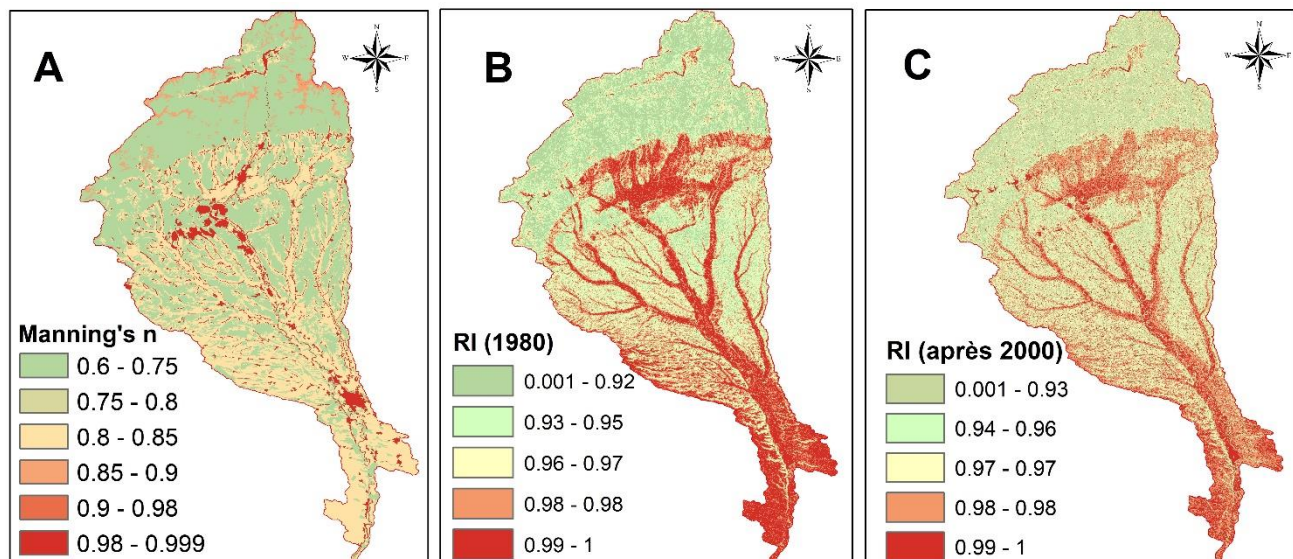
- Le calcul manuel, si les deux cartes (du facteur W et de l’indice RI) ont été créés par l’utilisateur. La rugosité topographique (RI) est plus difficilement d’obtenir de façon indépendante sans faire appel aux fonctionnalités SedInConnect, alors cette troisième option est la moins utilisée [[Crema et Cavalli, 2017](#)].

Dans notre étude, nous avons opté pour la deuxième approche, qui implique la création au préalable de la carte du facteur W à partir des valeurs de l’indice « n » de Manning. La base de données spatiales qu’on a utilisée a été celle des unités de sol groupés selon la méthodologie FAO – UNESCO<sup>21</sup> [[FAO-Unesco, 1974](#)], qui tient compte des textures des sols, de la végétation et de l’existence des éléments anthropiques qui pourraient constituer des obstacles à l’écoulement et au transfert des sédiments. A partir des valeurs de chaque attribut d’unité de sol DSMW, le calcul de l’indice « n » de Manning se fait de la manière suivante :

$$W_{\text{Manning's « n »}} = \frac{1}{\text{Valeur DSMW}}$$

<sup>21</sup> Pour plus d’informations sur le contenu de la base de données DSMW de FAO – UNESCO, consultez le fichier de métadonnées de l’archive « Soil Mapping Unit Composition » disponible sur le site officiel de DSMW

De cette façon, la carte du facteur W selon l'approche de l'indice « n » de Manning présentera des valeurs de 0 à 1, les plus petites représentant les zones couvertes par une végétation abondante (des fortes), les valeurs intermédiaires correspondant aux zones agricoles et les valeurs proches de 1 représentant les zones urbaines ou les terrains artificialisés (*Figure IV.38 A*).



**Figure IV.38.** Les cartes des facteurs de pondération de l'impédance topographique : **A.** La carte de l'indice « n » de Manning ; **B.** La carte de l'indice de rugosité « RI » automatiquement obtenue en SedInConnect pour le modèle numérique altitudinal de l'année 1980 ; **C.** La carte de l'indice de rugosité « RI » automatiquement obtenue en SedInConnect pour le modèle numérique altitudinal de la période après 2000

En ce qui concerne la deuxième carte, de l'indice de rugosité « RI », celle-ci a été obtenue au préalable dans une session de SedInConnect, en faisant le choix de création automatique de l'indice de rugosité à la base du modèle numérique de terrain [Crema et Cavalli, 2017]. Si pour le facteur W, il y a eu une seule carte pour les deux moments, 1980 et les années 2000, le RI a pu être calculé séparément pour les deux périodes, en utilisant pour chacune son propre modèle numérique de terrain (*Figure IV.38 B* et *Figure IV.38 C*).

#### 4.3.3.4. Les réglages fins de la mise en route de l'indice de connectivité

Le pas final dans l'analyse de connectivité a été d'établir la valeur de la moyenne glissante (angl., *moving average*) des pixels considérés pour l'homogénéisation de l'information spatiale topographique. Le nombre de fenêtres glissantes a été choisi en fonction de la résolution spatiale des cartes (qu'on a convenu la maintenir à 30x30 m, pour pouvoir amener le modèle numérique du bassin de la rivière Jilț, de 12,5 m à la résolution plus faible du modèle EU-DEM, l'inverse n'étant pas possible). Le choix de la valeur de la fenêtre glissante se fait en fonction du niveau de détail de l'analyse, tout en tenant compte des limites techniques de l'outil de calcul de la connectivité.

Pour comprendre comment on fait le choix, on évoque la raison derrière la création de l'indice de connectivité. Au cours des dernières décennies, l'intérêt d'évaluer la connectivité des sédiments et de l'eau de l'amont à l'aval à travers les analyses géo-morphométriques s'est principalement développé autour des petits bassins hydrographiques montagneux. Dans les Alpes Italiens et Français notamment, espace géographique

caractérisé par des aléas hydro-géo-morphologiques fréquents (ravinement et érosion en rigoles, coulées de débris, glissements de terrain), les conditions morphologiques qui conduisent à un fort degré de connectivité ou, au contraire, au découplage entre les versants et les rivières, ont été largement investiguées [Cain et Swanson, 1989 ; Cavalli *et al.*, 2013 ; Heckmann *et al.*, 2018]. Des études de cas particulières sur la connectivité dans les vallées alpines ont démontré le rôle extrêmement important joué par les indices de connectivité dans la connaissance du transfert des sédiments [Marchi *et al.*, 2014 ; Crema *et al.* 2017]. Il est largement reconnu que la topographie peut induire des grandes variations dans la manifestation des processus liés à l'érosion, transport et dépôt des sédiments, surtout lorsqu'il s'agit des bassins versants petits (de montagne), réagissant très vite pendant les crues en termes d'évacuation des sédiments vers les lits des rivières. Néanmoins, la topographie agit aussi en fonction de la résolution spatiale.

Le critère considéré est celui de la limite inférieure de l'information spatiale qu'on peut obtenir sur notre bassin versant à partir des deux groupes de modèles numériques de terrain. Etant données les limites techniques de fonctionnement du logiciel SedInConnect lorsqu'il s'agit des bassins hydrographiques étendus sur plusieurs milliers de km<sup>2</sup> (il a été initialement créé pour calculer la connectivité dans des bassins versants de petite taille), nous avons imposé une fenêtre glissante de 3 pixels, qui est plus au moins le résultat du rapport entre les deux résolutions spatiales (celle de 30 m et celle de 12,5 m).

#### 4.3.4. Résultats et discussion sur l'analyse de connectivité

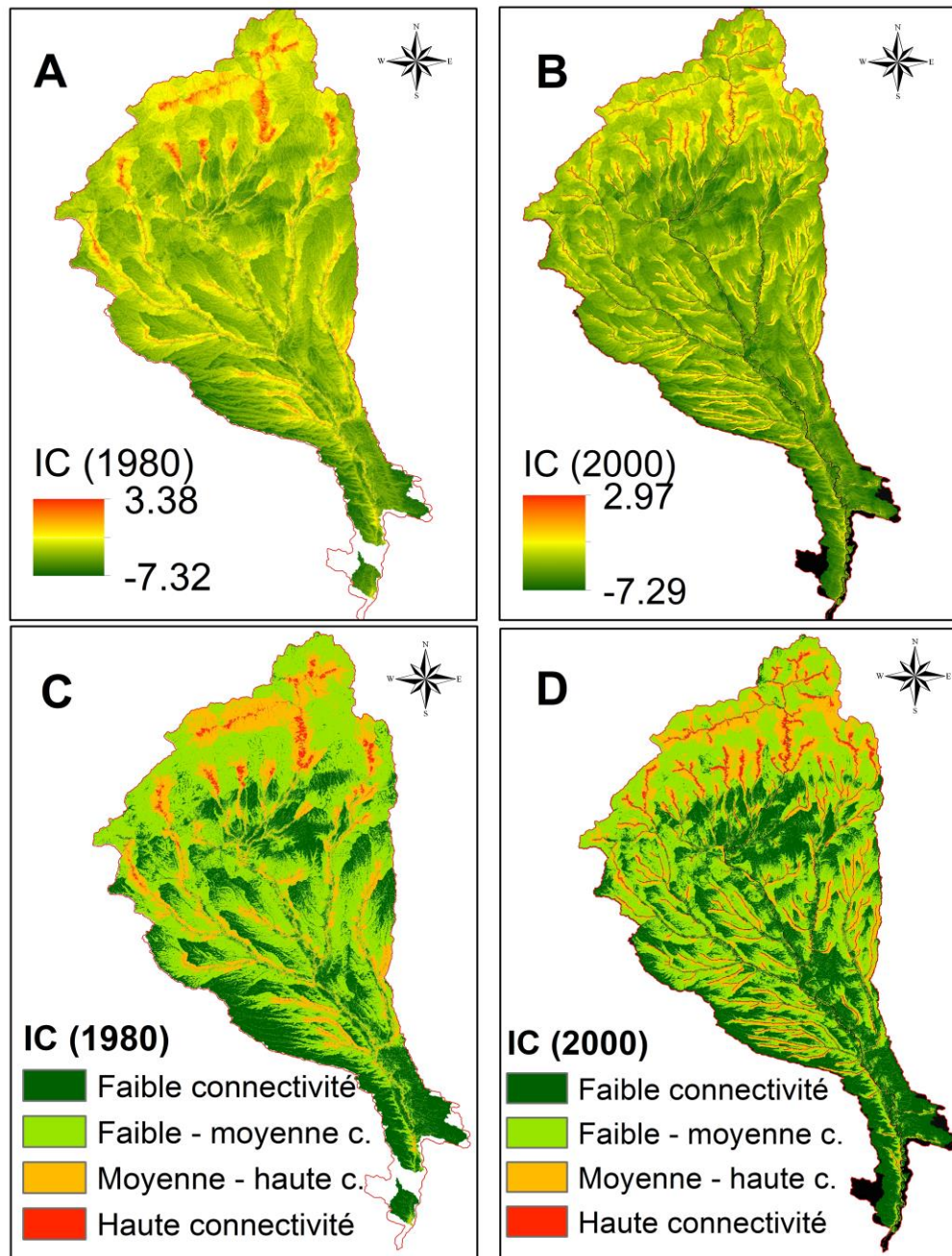
Sur la base des considérants méthodologiques qu'on vient de détailler, nous avons réalisé des cartes de connectivité sédimentaire pour les deux situations temporelles, des années 1980 et après 2000.

Le calcul de l'indice de connectivité (IC) [créé initialement par Borselli *et al.* (2008) et développé/amélioré ultérieurement par Cavalli *et al.* (2013)] a été fait pour tout le bassin de la rivière Jiu, tandis que pour mettre en évidence la connectivité de certains sous-bassins, le raster initial a été découpé et traité géostatistiquement.

##### 4.3.4.1. Les zones sources de sédiments les plus connectées au réseau hydrographique

L'analyse spatiale du degré de connectivité amont – aval entre les zones sources potentielles du secteur supérieur et le réseau hydrographique du bassin de la rivière Jiu, est illustrée sur les deux paires de cartes. Pour le premier type de représentation cartographique (**Figure IV.39 A et B**), nous avons utilisé le gradient des valeurs de l'IC, ayant en théorie de minimum -7 vers maximum +7. Les couleurs des 2 gradients de l'IC, pour les années 1980 et de l'IC pour la période après 2000, ont été automatiquement attribuées selon la méthode « percent clip ». Pour le deuxième type de représentation cartographique (**Figure IV.39 C et D**), le degré de connectivité est ainsi exprimé en 4 classes constitués selon la règle « natural breaks » (méthode usuellement employée par les auteurs de l'indice), car il n'y a pas de moyen statistique pour inclure un certain intervalle dans une classe de connectivité ou l'autre. Selon la distribution des valeurs de connectivité des pixels de chaque carte, les 4 intervalles de valeurs formant les classes de faible, faible – moyenne, moyenne - haute et haute

connectivité seront différents, ce qui peut poser de problèmes lorsqu'on essaie de comparer les résultats de deux cartes.



**Figure IV.39.** Les cartes de la connectivité dans le bassin de la rivière Jiu : Représentation type gradient couleurs des valeurs brutes de l'IC (A. selon le modèle numérique de 1980 ; B. selon le modèle numérique des années 2000) ; Représentation par 4 classes de connectivité (C. selon le modèle numérique de 1980 ; D. selon le modèle numérique des années 2000)

La variation spatiale des valeurs de la connectivité reproduit les caractéristiques morphométriques et géologiques du bassin de la rivière Jiu. Particulièrement dans les secteurs supérieurs de sous-bassins, les pentes plus raides, susceptibles à l'érosion, présentent une connectivité plus importante avec le réseau hydrologique principal. Les zones karstiques agissent comme des facteurs de découplage pour la connectivité du flux sédimentaire, bloquant le développement des voies de transport des sédiments. En comparant les deux cartes,

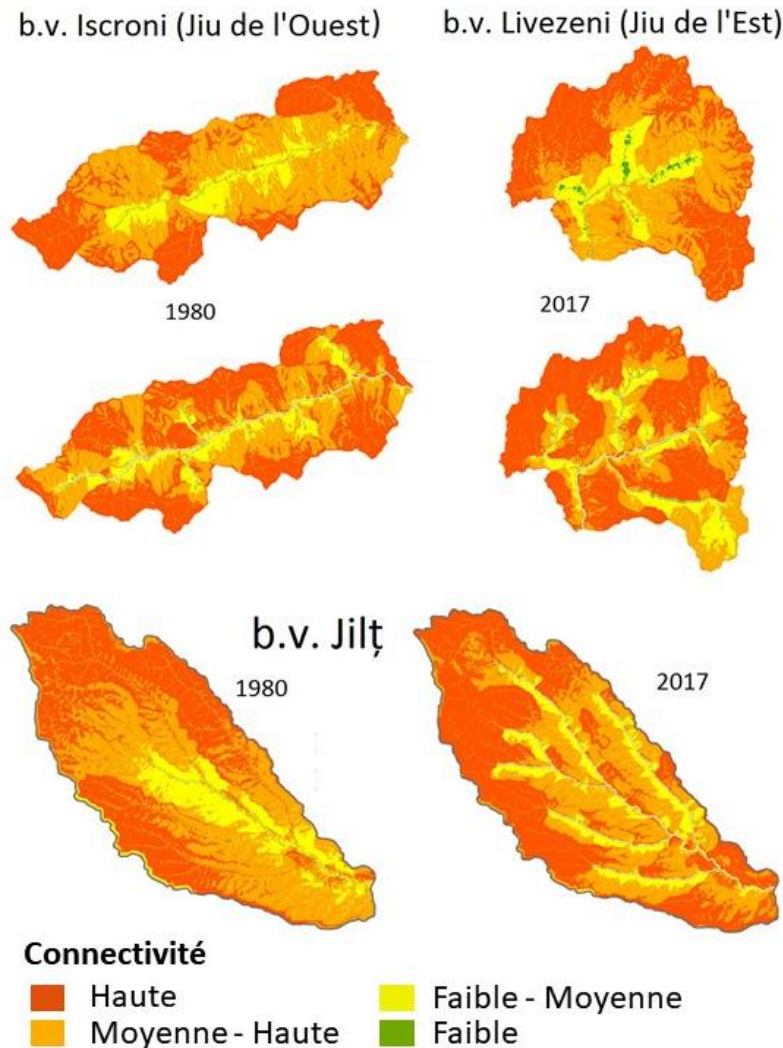


on voit une baisse générale de la connectivité sédimentaire entre les deux périodes, la superficie des zones caractérisées par un haut degré de connectivité sont diminuées de 23% après 2000. Les plus importants changements de connectivité se sont produits sur les interfluves ou sur les parties supérieures des versants, situés dans les têtes des sous-bassins. Un découplage progressif lorsqu'on remonte en altitude dans le bassin de la rivière Jiu peut être expliqué par la présence du relief artificiel (carrières de charbon plus étendues et plus de tas de stérile) qui a continué à se développer entre les années 1980 et 2000.

Une autre explication pour ces changements de connectivité peut être attribuée aussi à la façon de constituer les intervalles des 4 classes de connectivité. La méthode employée (qui est en fait celle recommandée par les auteurs de l'indice) étant celle de l'attribution automate des intervalles selon la règle des limites naturelles, va forcément introduire des différences de valeurs limite (min et max) des intervalles qu'on considère équivalent pour les 4 classes de connectivité. La comparaison de deux cartes est, de cette façon, moins précise lorsque les valeurs brutes limites (min et max des pixels de connectivité) sont différentes d'une situation à l'autre. Nous aurions pu faire aussi l'exercice de l'évaluation experte des 4 classes, selon des intervalles choisis par l'utilisateur, ce qui aurait pu permettre une meilleure comparaison du degré de connectivité entre les deux cartes. Cette meilleure façon de représentation de la connectivité doit être considérée en perspective de ce travail.

Si on revient à l'analyse spatiale de la connectivité, en comparant les cartes de connectivité résultantes pour les sous-bassins de montagne (de la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est), les zones minières semblent être très bien reliées au réseau hydrographique, expliquant l'enrichissement des sédiments fins avec le charbon, qui se trouve piégé dans les dépôts sédimentaires dans le secteur inférieur de la Jiu (ce que l'on constatera plus loin au chapitre §8). Au contraire, pour les sous-bassins développés notamment dans le piémont (les bassins des rivières Motru, Gilort, même de la Jilț), avec une topographie apparemment déconnectée par rapport aux rivières collecteurs, un degré de connectivité plus faible a été trouvé entre les carrières de lignite et la rivière Jiu. Enfin, il convient de noter que les sous-bassins inférieurs (notamment les bassins des rivières Amaradia et Raznic) ne présentent pas des valeurs très élevées de l'indice de connectivité, car la prépondérance de l'information topographique dans le calcul du facteur de pondération ne reflète pas pleinement la connectivité sédimentaire réelle. Sur la rivière Jiu, les secteurs les plus connectés se trouvent entre la sortie des gorges et l'entrée dans le piémont (on prend comme repères amont – aval les stations hydrométriques de Sadu et Rovinari) et en aval de la ville de Craiova, le long du secteur étroit de plaine, où les versants et interfluves sont très proches de la rivière Jiu, assurant ainsi un bon couplage latéral. Dans la **Figure IV.40**, nous avons la possibilité d'observer les différences de connectivité entre les années 1980 et 2000, pour les sous-bassins hydrographiques liés à la production du charbon.



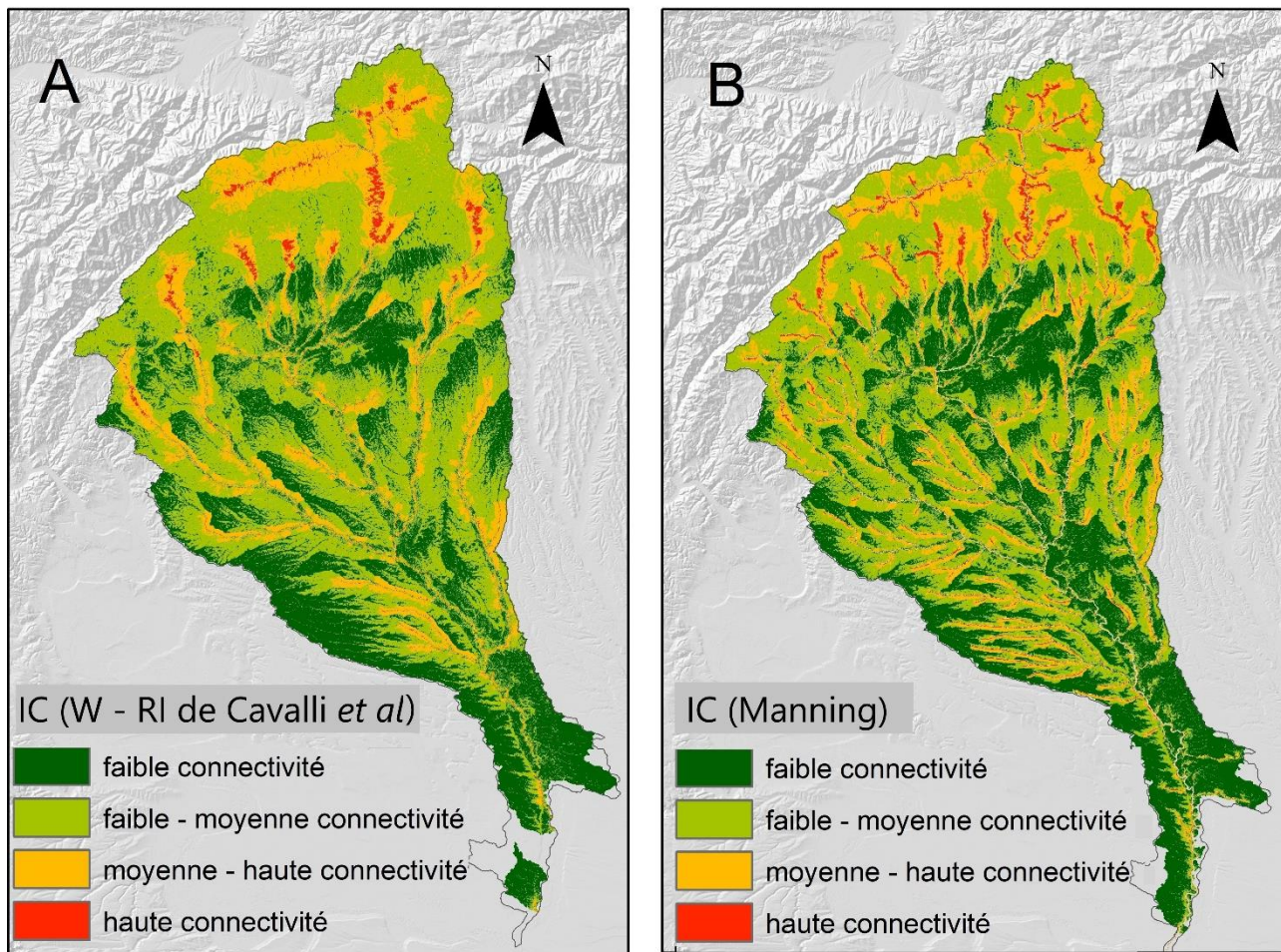


**Figure IV.40.** Changements dans la connectivité entre les années 1980 et 2000 pour les bassins des rivières Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Jilț. Afin de pouvoir comparer les deux situations, nous avons utilisé le gradient de couleurs et pas la méthode d'intervalles « natural breaks »

Même si au premier regard les changements semblent être importantes, surtout pour les têtes du bassin et les zones plus proches de la ligne de partage des eaux, il ne faut pas oublier la façon statistique de quantifier ce degré de connectivité, en utilisant la méthode « natural breaks ». Ainsi, pour deux situations différentes, avec séries de valeurs de pixels de valeurs minimale, maximale, médiane et d'écart type forcément différents, il est attendu que les intervalles de degré de connectivité (faible à haute) ne soient pas les mêmes. Or pour des comparaisons futures, il faudra impérativement trouver une autre méthode statistique d'exprimer la connectivité sédimentaire sur les cartes.

L'analyse comparative de la connectivité après 2000 pour les deux situations de rugosité considérées (avec l'indice de rugosité, *RI*, de Cavalli et al., 2013, et l'indice de Manning « *n* »), montre des résultats assez intéressants issus des différences de rugosité, selon les 2 méthodes de calcul utilisées (**Figure IV.41**). Une valeur proche de 1 signifie une impédance plus grande à l'écoulement, et, donc, une connectivité plus petite, mais l'écart des valeurs sur les deux types de cartes est tout à fait différent. Lorsque l'indice de Manning « *n* »

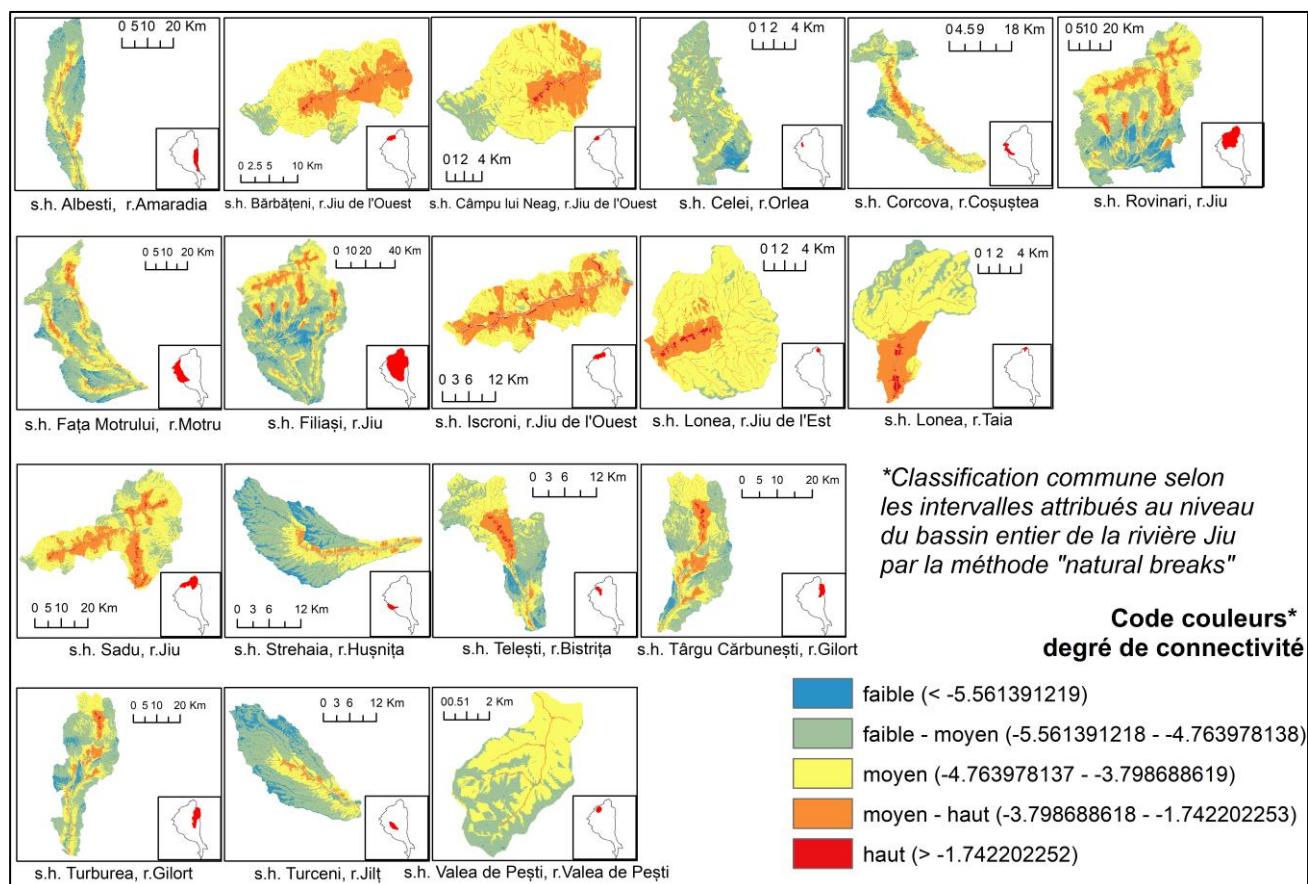
(utilisant un calcul sur les valeurs normalisées de l'occupation du sol, varie de 0,1 à 0,99, l'indice de rugosité RI (obtenu automatiquement à partir du modèle numérique de terrain) présente des valeurs plus proches, de 0,3 à 0,66. Cette différence d'écart des valeurs des deux indices de rugosité peut être la cause des valeurs plus ou moins homogènes de connectivité sédimentaire.



**Figure IV.41.** Les cartes de la connectivité dans le bassin de la rivière Jiu pour la situation après 2000: **A.** En utilisant l'indice de rugosité RI; **B.** En utilisant l'indice de Manning « n »

Sur la base de l'indice de connectivité construit avec la méthode de calcul de la rugosité du terrain de Cavalli, l'analyse hydrographique a montré quels bassins versants sont plus connectés à la rivière Jiu. A partir de la carte de connectivité de la période d'après 2000, nous avons représenté la connectivité de chaque sous-bassin versant principal (**Figure IV.42**). Les intervalles ont été choisis pour tous les bassins versant de la même façon, en appliquant les valeurs des 5 classes de connectivité (selon la méthode de Natural Breaks - de l'indice du bassin entier de la rivière Jiu. Les bassins de Tismana et d'Amaradia Pietroasă, en grande partie situés dans les dépressions subcarpatiques, sont les plus connectés, avec plus de 40% de leur superficie caractérisée par un haut degré de connectivité selon la classification de « *natural breaks* ». A l'opposé, ces sont les sous-bassins de montagne les plus découplés de la vallée de la Jiu, certainement en raison de la forte rugosité, de la topographie hétérogène qui agit comme facteur de déconnection des versants (comme zones sources potentielles de sédiments) et les vallées.





**Figure IV.42.** La connectivité sédimentaire des principaux sous-bassins versant au niveau des années 2000

On a accordé une attention particulière au bassin de la rivière Jilț, afin de déterminer ses parties les plus connectées avec l'aval (la rivière Jiu). La statistique spatiale a été portée plus en détail, sur chacune des carrières de charbon (dont on a parlé précédemment en expliquant le seuillage du réseau hydrographique, voir la **Figure IV.34**). Les carrières les plus connectées sont Timișeni et Roșița et les moins connectées sont les carrières de Mătăsari et Pinoasa (**Tableau IV.9**).

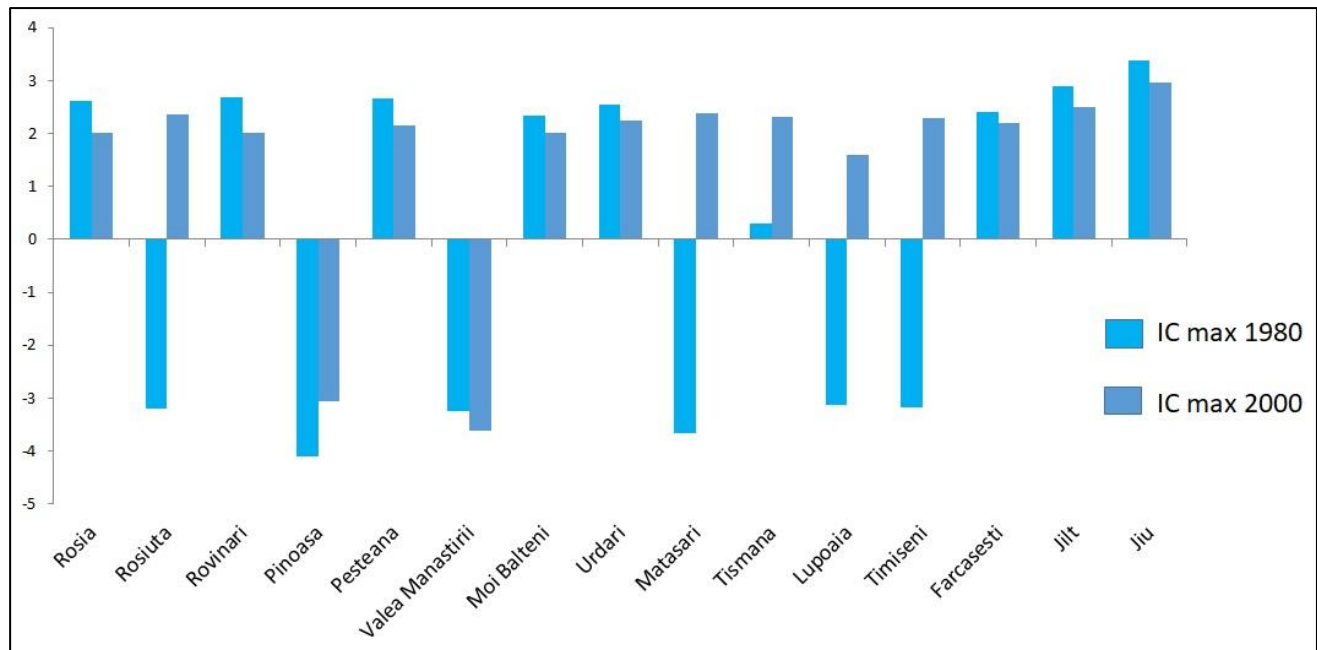
**Tableau IV.9.** Les paramètres statistiques de base (min, max, écart type) des valeurs de connectivité des carrières de charbon du bassin de la rivière Jilț (valables pour la situation actuelle)

Nom mines de charbon à ciel ouvert	IC <sub>MIN</sub>	IC <sub>MAX</sub>	STD <sub>IC</sub>
Roșia	-6.31	2.62	0.74
Roșița	-6.78	-3.20	0.42
Rovinari	-6.36	2.69	0.95
Pinoasa	-7.09	-4.10	0.37
Peșteana	-7.10	2.66	0.73
Valea Mănăstirii	-6.40	-3.24	0.36
Moi Balteni	-6.25	2.33	0.82
Urdari	-6.35	2.55	0.71
Mătăsari	-7.01	-3.66	0.43
Tismana	-6.58	0.29	0.54

Lupoia	-6.71	-3.12	0.43
Timișeni	-6.56	-3.17	0.38
Fărcășești	-6.63	2.40	0.62
Jilț	-7.15	2.89	0.64
Jiu	-7.32	3.38	0.88

Les changements dans la connectivité intervenus dans le bassin de la rivière Jilț sont, en général, de croissance vers la partie supérieure du bassin (où il y a la plupart des carrières de charbon) et de décroissance (pour la partie aval du bassin). Les valeurs moyennes du degré de connectivité entre 1980 et la période après 2000 ont augmenté pour toutes les surfaces occupées par des carrières, à l'exception de celle de la carrière Roșița, qui semble à présent moins connectée à la rivière Jilț et au système fluvial de la Jiu.

En ce qui concerne les valeurs maximales de l'indice de connectivité des carrières de lignite (*Figure IV.43*), la situation se présente un peu différemment. Si les carrières de charbon avec une valeur maximale de connectivité positive (et en général supérieure à 0,1) en 1980 ont subi une petite baisse de la valeur maximale après 2000 (i.e. les carrières de Roșia, Peșteana, Rovinari, Fărcășești), les carrières dont la valeur maximale de connectivité était dans les années 1980 proche de 0 ou négative, ont pour la plupart fortement augmenté cette valeur, jusqu'à l'intervalle positif (i.e. les carrières de Roșița, Mătășari, Lupoia, Timișeni). Seulement deux carrières (Pinoasa et Valea Mănăstirii) ont conservé leur maximum de connectivité au-dessous de 0 entre les deux périodes d'analyse.



**Figure IV.43.** La connectivité maximale des carrières de charbon. Analyse comparative entre 1980 et les années 2000

Au vu des constats de cette dernière analyse, il semblerait que l'extension du relief anthropique et l'apparition de nouveaux tas de stériles au fur et à mesure de l'élargissement des carrières de charbon rend les zones amont des bassins miniers plus connectées à la rivière Jiu, créant les prémisses pour le rôle plus important

de ces zones de production sédimentaire. Cette évolution va à l’opposé de la tendance générale de baisse des activités liées à l’exploitation et la production de charbon.

#### 4.3.4.2. La relation entre la connectivité sédimentaire et les processus géomorphologiques

A la base des résultats du chapitre §4.2, nous avons calculé la valeur moyenne de la connectivité sédimentaire pour chaque polygone représentant les processus géomorphologiques identifiés. L’opération d’extraction de la valeur de la connectivité s’est faite à l’aide de l’outil Spatial Statistics du logiciel ArcGis 10.4.1. Le **Tableau IV.10** dans quelle classe de connectivité les processus géomorphologiques sont encadrés, selon les attributs qu’on a étudiés au chapitre §4.2. Les intervalles pour les 4 classes de connectivité sont ceux de la carte de connectivité des années 2000, générées automatiquement par la méthode « natural breaks ».

**Tableau IV.10.** Le degré de connectivité moyen des processus géomorphologiques, en fonction de leurs attributs

CONNECTIVITE		Faible	Faible - moyenne	Moyenne - haute	Haute
<b>Générale (tous les processus)</b>		256	943	308	-
<b>Processus</b>	<i>Chutes</i>			X	
	<i>Coulées</i>			X	
	<i>Ravines</i>			X	
	<i>Glissements</i>		X		
<b>Profondeur</b>	<i>Superficiels</i>		X		
	<i>Moyens</i>		X		
	<i>Profonds</i>			X	
<b>Impact</b>	<i>Tamponné</i>		X		
	<i>Riverain</i>			X	
	<i>Occlusion</i>			X	
	<i>Blocage</i>			X	
	<i>Oblitération</i>			X	
<b>Interfaces de couplage géomorphologique</b>	<i>Surfacique</i>			X	
	<i>Indirecte</i>		X		
	<i>Linéaire</i>			X	
	<i>Nh</i>		X		
	<i>Nv</i>			X	
	<i>Ponctuelle</i>			X	

Les processus géomorphologiques présentent un degré de connectivité faible – moyenne et moyenne – haute. Les glissements semblent être les moins connectés, tandis que les chutes (étant en contact avec les versants étroits des vallées montanes) ont le degré de connectivité le plus haut. Les glissements considérés profonds sont les plus connectés. Les attributs d’impact des rivières par les glissements et coulées, les processus tamponnés sont les moins connectés, les 4 autres catégories ayant des degrés de connectivité un peu plus hauts. En ce qui concerne les attributs d’interface avec les rivières, le degré de connectivité semble aussi être logique : les processus dont l’interface de couplage géomorphologique a été apprécié par rapport à leur position comme indirecte et les suspendu sur le versant (dans des dépôts alluviaux notamment), le degré de connectivité qu’on a trouvé a été plus petit que sur les processus dont le couplage avec le réseau hydrographique est plus direct (surfacique, linéaire ou ponctuel).



#### 4.3.4.3. La relation entre la connectivité sédimentaire et la production sédimentaire

La dernière analyse porte sur la relation entre la connectivité potentielle (sur la base de l'indice IC) et la spatialisation en concret du taux de production sédimentaire (selon un modèle d'érosion des sols).

En Roumanie, les recherches systématiques sur l'érosion du sol sur des parcelles expérimentales ont débuté approximativement en même temps avec celles menées au niveau international. Le promoteur des expérimentes a été [Staicu \(1945\)](#) dont les recherches ont été continuées par [Moțoc M.](#) entre 1965 et 1998 ; [Stănescu \(1979\)](#) et [Ioniță \(1990 – 2000\)](#) ont mené des expérimentations concernant notamment les parcelles situées dans des terres agricoles de plaine et plateau de la région de Moldavie et dans le sud-est du pays (la Plaine Roumaine). La première carte de l'érosivité pluviale apparaît sous la touche de [Drăgan et Stănescu \(1970\)](#) et cinq ans plus tard, [Moțoc & collab.](#) ont proposé des méthodes de lutte contre l'érosion du sol [[Moțoc et al., 1975](#)]. Des études d'érosion sur des parcelles expérimentales des bassins versants carpatiques (la rivière Bistrița Moldave) ont été aussi menées par [Rădoane N. \(1987\)](#). Dans les dernières deux décennies, les recherches de géomorphologie appliquée ont été souvent orientée à résoudre les problèmes d'érosion et les processus de versant sur les bassins de petite et moyenne taille tels que celui de la rivière Hârtibaciu [[Grecu, 1992](#); [Grecu, 2018](#)], Olteț [[Jurchescu, 2013](#)], ou Putna et Trotus [[Tatu, 2013](#)]. Les techniques SIG ont servi à calculer les facteurs qui composent l'équation initiale de l'USLE<sup>22</sup> ou l'équation du modèle général de l'érosion en Roumanie (**ROMSEM**), à partir du bilan hydrique dans les bassins versant expérimentales [[Miță, 1977](#); [Adler, 1993](#)]. Le modèle déterministe ROMSEM (*Romanian Soil Erosion Model*) est toujours en cours d'amélioration à l'aide des modèles de simulation du bilan de l'eau dans le sol et des modèles de prognose des pertes de sol [[INCPA Bucarest](#)].

L'étape des modèles simples, empiriques, s'est construite à travers les équations résultant du traitement des données expérimentales. Cette étape se caractérise par l'élaboration de l'Equation Universelle de l'Erosion du Sol (USLE) [[Musgrave \(1947\)](#) et [Wischmeier \(1955, 1976\)](#)]. Les recherches menées sur les parcelles expérimentales, en fonction des caractéristiques morphométriques des bassins versant (notamment la superficie) et d'autres facteurs influençant l'érosion (par exemple l'occupation du sol) ont conduit à la version originale de l'équation de l'USLE [[Wischmeier & Smith, 1978](#)] :

$$A = R * K * L * S * C * P$$

où A → le taux moyen de l'érosion (t/ha/an) ;

R → l'indice d'érosivité pluviale (y compris l'influence de la fonte de neige, là où il est le cas) ;

K → le facteur d'érodabilité du sol, comme exprimant la susceptibilité intrinsèque du sol à l'érosion ;

L → le facteur d'influence de la longueur de l'écoulement sur le versant ;

S → le facteur d'influence de la pente ;

C → le facteur d'influence de l'utilisation de la terre ;

---

<sup>22</sup> USLE – Universal Soil Loss Equation

P → le facteur d'influence des travaux anti-érosion.

Dans une seconde étape, des modèles empiriques et déterministes, qui tiennent compte de la pluie tombée pendant une certaine période, ou même du débit liquide ont été développés pour estimer le débit solide résultant. On mentionne dans cette catégorie les modèles RUSLE (1979), dont les équations dérivées sont basées sur le modèle initiale USLE, ainsi que les modèles ANSWERS [Beasley *et al.*, 1980], EPIC [Williams, 1985], MORGAN [1995], ROMSEM [Moţoc *et al.*, 1975] et encore d'autres [Grecu, 2018].

Dans notre analyse, étant donné que l'obtention de la carte de l'érosion du sol en vue de l'estimation de la production sédimentaire n'a pas été un de nos objectifs méthodologiques, nous avons utilisé la base de données RUSLE disponible pour la plupart des pays européens à une résolution spatiale de 25 m [Panagos *et al.*, 2012 ; Panagos *et al.*, 2015]. Nous ne détaillerons pas beaucoup les pas de calcul des facteurs composant l'équation, mais nous présenterons brièvement ce modèle.

**RUSLE** est l'acronyme pour *l'Equation Universelle de l'Erosion du Sol Revisitée* et par rapport à l'équation USLE, le modèle RUSLE présente certaines différences [Renard *et al.*, 1997, cité par Grecu, 2018]. Celles-ci portent sur le facteur « **R** » (qui décrit l'érosivité de la pluie), qui utilise le paramètre  $EI_{30}$  (où E est l'énergie cinétique totale de la pluie, en MJ/ha/mm) et  $I_{30}$  est l'intensité de la pluie torrentielle (en mm/h) sur une durée de 30 min. Ainsi, l'indice de l'érosivité pluviale pour l'équation RUSLE résulte de la relation suivante [Grecu, 2018]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^j (EI_{30})_i}{N}$$

où,  $(EI_{30})_i$  = l'indice d'érosivité pluviale pour « i » pluies ;

j = le nombre de pluies pendant une année ;

N = le nombre des années considérées.

Une autre différence est représentée par le facteur de correction pour les superficies horizontales et quasi-horizontales sur lesquelles le sol est (plus) protégé par l'action de la pluie [Blaga *et al.*, 2014] :  $R_c = e^{(0,49[y-1])}$ , où « e » est la base du logarithme naturel et « y » est la profondeur de l'horizon protecteur du sol.

Le facteur **K** comporte aussi une différence pour RUSLE, par rapport à l'USLE, qui consiste dans l'existence de 10% de fraction grossière ( $\Phi > 2$  mm)<sup>23</sup> [Grecu, 2018].

Enfin, une dernière différence concerne le facteur **C** (qui est lié à la gestion des terres), dont le calcul englobe 5 différents autres sous-facteurs :  $C = PLU * CC * SC * SR * SM$ <sup>24</sup>.

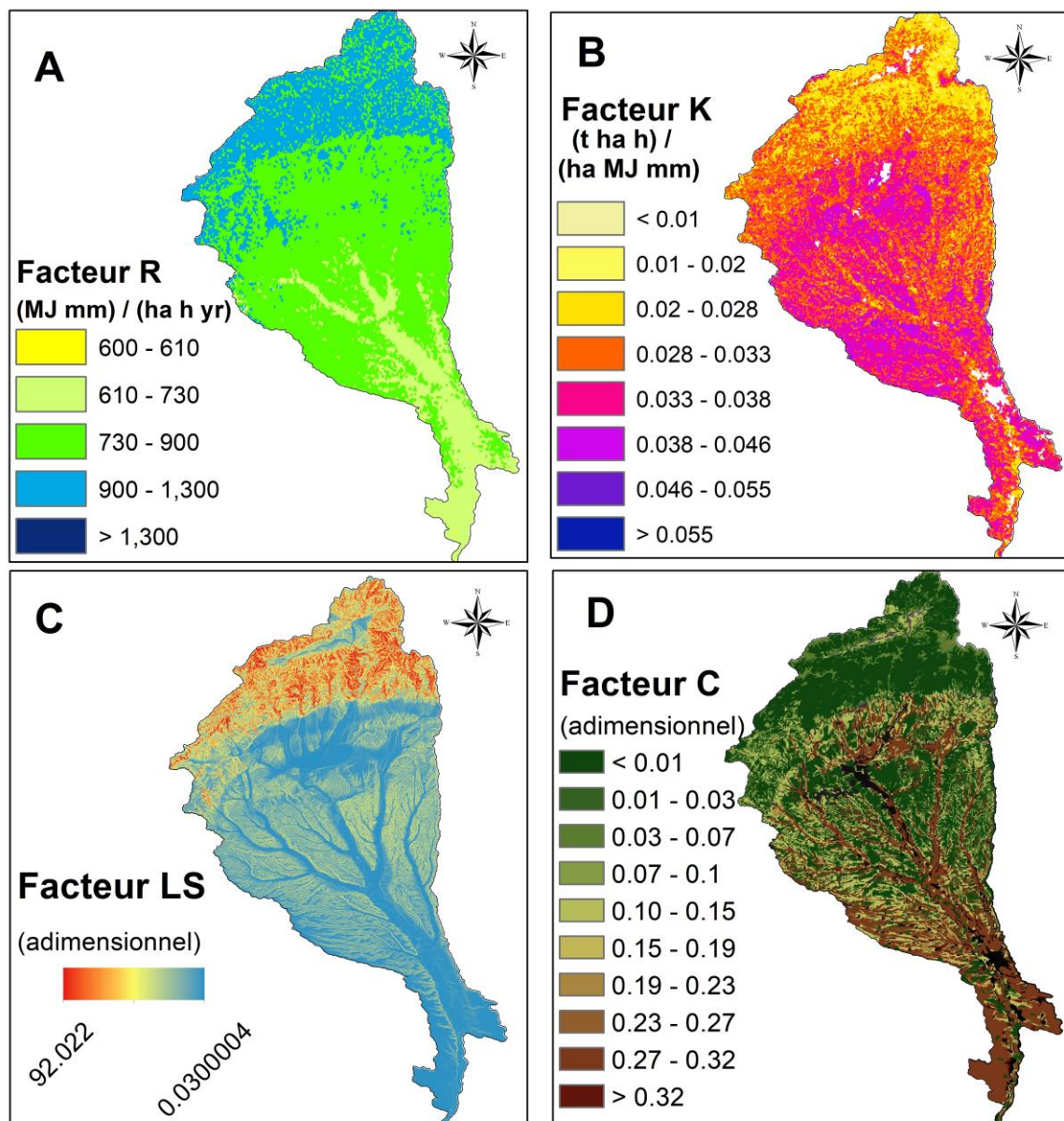
Même si le calcul de chacun de ces facteurs pourrait être intéressant pour notre analyse, en raison du manque de temps et d'une démarche qui excède notre but de comparer le résultat final sur l'érosion du sol avec celui de la carte de connectivité, nous avons utilisé pour notre analyse la base de données européenne RUSLE<sup>25</sup> [European Soil Data Centre, 2017]. Dans la **Figure IV.44** nous présentons les facteurs qui sont inclus dans

<sup>23</sup> Pour plusieurs détails sur la nouvelle formule de calcul du facteur K, se référer à Grecu (2018)

<sup>24</sup> PLU (Prior Land Use); CC (Crop Canopy); SC (Surface Cover); SR (Surface Roughness); SM (Soil Moisture)

<sup>25</sup> European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre

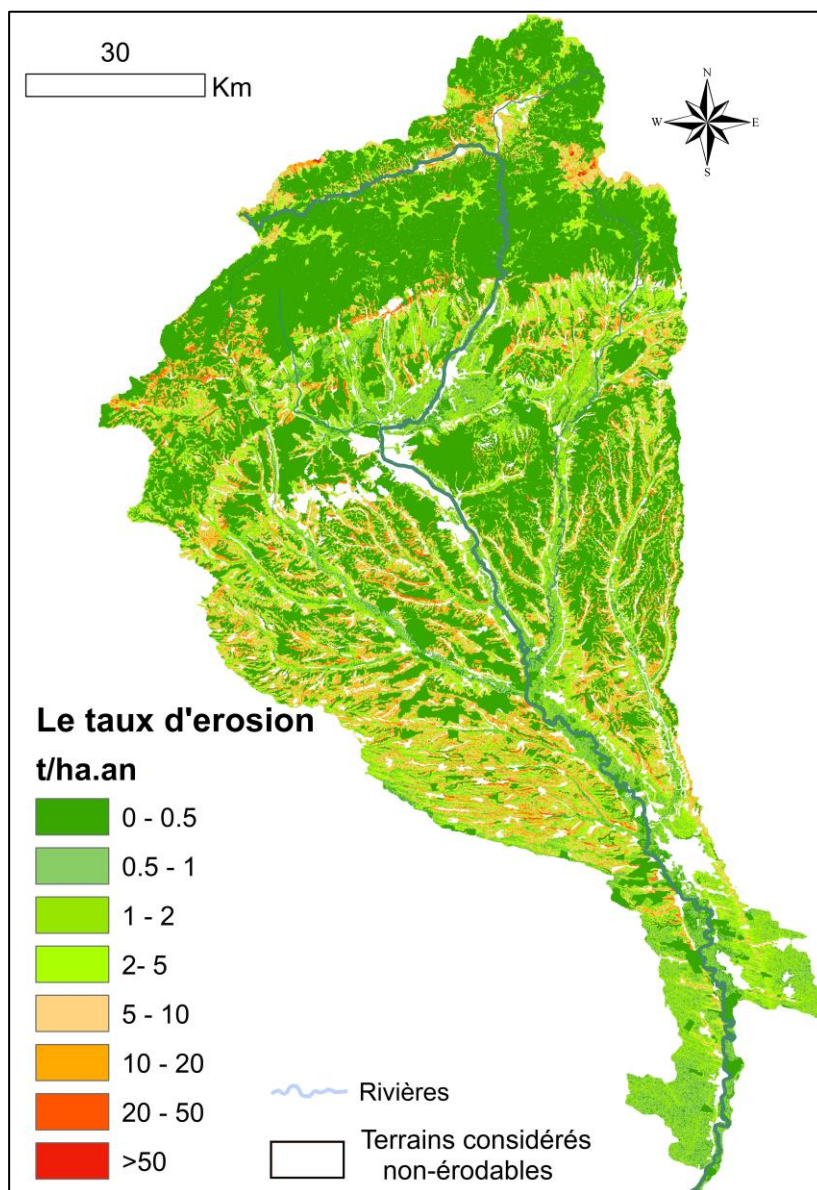
l'équation de RUSLE : Erosivité de la pluie (le facteur R, cf. Panagos *et al.*, 2015a), Erodabilité du sol (le facteur K, cf. Panagos *et al.*, 2014), la topographie (le facteur LS) et la gestion des sols agricoles (le facteur C, cf. Panagos *et al.*, 2015b).



**Figure IV.44.** Les facteurs principaux englobés dans l'équation RUSLE : **A.** le Facteur R, **B.** le facteur K, **C.** le facteur LS ; **D.** le facteur C (les couleurs et les intervalles de valeurs utilisés sont conformes aux standards de la base de données européennes ESDAC)

Ensuite, dans la **Figure IV.45**, nous présentons la carte finale du taux d'érosion [t/ha/an], qu'on a obtenu en multipliant les facteurs ci-dessus. Les valeurs du taux d'érosion (vu comme vecteur de production potentielle de sédiments) vont de 0 à ~148 t/ha/an. Nous observons que le taux le plus élevé de l'érosion concerne les secteurs bas des bassins versant (surtout les bassins des rivières Tismana et Amaradia Pietroasă, développés dans le cadre des dépressions subcarpatiques) et le Piémont Gétique (coté occidental du bassin de la rivière Coșuștea, le bassin de la rivière Argetoiaia, le bassin inférieur de la rivière Amaradia). Dans le bassin

de la rivière Jilț, les taux d'érosion augmentent de l'amont vers l'aval. Un aspect négatif de cette base de données est le manque d'informations dans les zones anthropisées, telles que les bassins miniers (tout le secteur supérieur du bassin de la Jilț) ou les zones urbaines (comme c'est le cas des villes de Craiova et Târgu Jiu).



**Figure IV.45.** La carte du taux d'érosion [t/ha.an] du bassin de la rivière Jiu selon la méthode RUSLE

Afin de comparer le degré de connectivité avec les résultats de l'estimation du taux d'érosion, nous avons sélectionné les zones dont le degré de connectivité (selon EU-DEM et W, RI calculés automatiquement) était moyen à haut et haut (donc la moitié supérieure des valeurs du degré de connectivité). Ensuite, nous avons analysé la statistique spatiale du taux d'érosion RUSLE des deux zones de degré de connectivité (IC) moyen – haut et haut (*Tableau IV.11*). On a exclu de l'analyse les pixels des zones non couvertes par l'analyse RUSLE (les terrains considérés non-érodables, qui font partie des zones urbaines, espaces commerciaux ou des sites d'extraction). Nous observons que l'intervalle RUSLE le plus commun est entre 0 et 10 t/ha.an, le taux



d'érosion supérieur caractérisant ceux de pixels. Le taux maximum d'érosion de tout le bassin versant de la rivière Jiu (148,335 t/ha.an) se retrouve dans les zones de connectivité moyenne à haute. Toutefois, la plupart des pixels illustrant une forte érosion potentielle sont isolés dans les abruptes rocheux du Massif Parâng, où le relief glaciaire et les versants inclinés sont naturellement affectés par l'érosion, n'affectant pas le réseau hydrographique en-dessous.

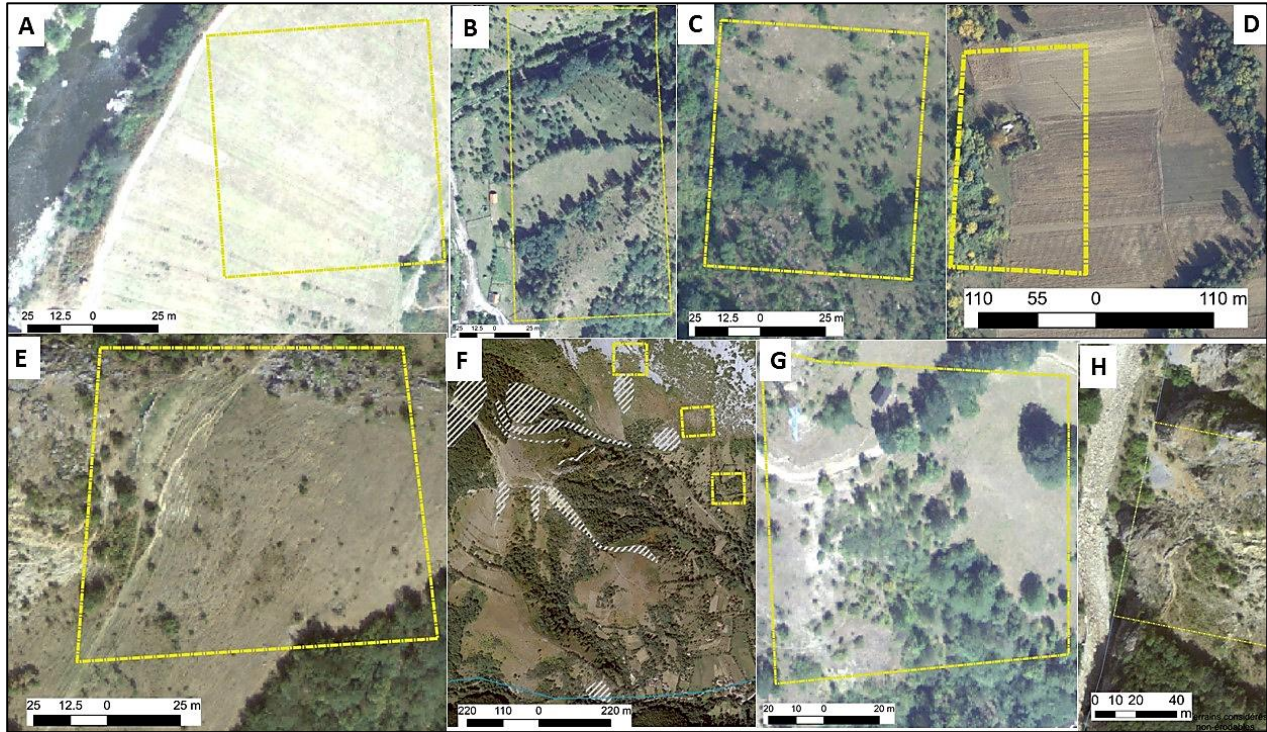
**Tableau IV.11.** La statistique des pixels RUSLE caractérisés par un degré de connectivité supérieur à la moyenne

RUSLE (t/ha.an)	Degré de connectivité	
	Moyen - Haut	Haut
0-20	96.1%	95.7%
20-30	2.88%	3.49%
30-40	0.55%	0.53%
40-50	0.18%	0.14%
>50	0.25%	0.13%
<i>Min</i>	0.0006	0.0005
<i>Max</i>	148.34	86.64
<i>Moyen</i>	3.291	2.424

Nous apprécions les résultats de la superposition des zones caractérisées par une forte connectivité sédimentaire et par des taux d'érosion potentiels importants comme étant un premier essai pour la mise en relation des sources de sédiments (l'implication de la connectivité amont – aval) avec le vecteur de la production (les processus d'érosion) et la proximité des rivières (le réseau hydrographique se trouvant plus au moins proche des pixels concernés). Des résultats plus pertinents aurait été difficiles à obtenir, étant donné l'inconvénient technique de cette démarche (le modèle RUSLE, réalisé au niveau du territoire européen entier, à partir de données spatiales d'une résolution inférieure à la connectivité) et, par conséquent, la perte d'information spatiale dans l'ajustement de la résolution de la connectivité de 30 m à 100 m '(celui du modèle RUSLE). Il y a une bonne relation entre la connectivité et le taux d'érosion dans les secteurs bas des bassins versant (où plus la connectivité était grande, plus le taux d'érosion était aussi élevé) et moins forte dans la zone de montagne (où le taux d'érosion est en général faible, mais le degré de connectivité variable).

Le taux d'érosion maximal des zones caractérisées par un degré de connectivité haut est beaucoup plus petit que celui des zones avec un degré de connectivité moyen – haut (86,638 t/ha.an par rapport à 148.336 t/ha.an). Également, les zones (pixels ou groupes de pixels) plus connectées au réseau hydrographique présentent un taux d'érosion moyen inférieur (2,424 t/ha.an) par rapport à celui de 3,291 pour les zones avec un degré de connectivité moyen à haut. Nous illustrons dans la **Figure IV.46** quelques exemples de zones près des rivières caractérisées par une connectivité potentielle importante, un taux d'érosion supérieur à 50 t/ha.an.





**Figure IV.46.** Exemples de zones caractérisées par une connectivité potentielle importante (moyenne – haute et haute) et un taux d'érosion supérieur à 50 t/ha.an dans le bassin de la rivière Jiu (les rectangles jaunes sont les zones autour ou à l'intérieur des pixels de superposition entre les deux critères) : **A.** Côté gauche de la Jiu à la sortie des gorges au droit de la ville Bumbesti Jiu ; **B.** Coté droite de la Jiu de l'Est, amont de Petrita ; **C.** Coté droite de la rivière Motru Sec ; **D.** Plaine inondable de la rivière Motru, aval de Brosteni ; **E.** Vallée de la rivière Sohodol ; **F.** Rivière Valea Verde, affluent dans le bassin supérieur de la Coșuștea, avec des versants affectés par des processus géomorphologiques (zones hachurées) ; **G.** Versant ubac de la Jiu de l'Est dans à Petrita ; **H.** Rive gauche de la rivière Sohodol, avec des processus géomorphologiques aussi

### *Synthèse partielle 3*

Dans le troisième sous-chapitre nous avons porté attention à la question de connectivité – couplage entre les zones sources potentielles de sédiments et les rivières. Nous avons détaillé la méthodologie de travail en vue d'obtention des cartes de connectivité et nous avons comparé l'indice de connectivité IC (Cavalli *et al.*, 2013) pour deux périodes de référence (1980 et les années après 2000) et nous avons focalisé l'observation sur les sous-bassins hydrographiques liés à l'extraction du charbon (la Jiu de l'Ouest, la Jiu de l'Est et la Jilț). Différentes méthodes de calcul de la rugosité topographique (impédance à l'écoulement et transport des sédiments) ont été essayées et leurs résultats en termes de cartes finales de connectivités ont été présentés.

Nous avons aussi analysé la relation entre les aires affectées par des processus géomorphologiques (identifiés dans le sous-chapitre précédent) et l'indice de connectivité, ainsi que le taux d'érosion selon la méthodologie RUSLE et la connectivité. Les résultats et les discussions sur la connectivité sédimentaire, en relation avec les caractéristiques du bassin de la rivière Jiu, les processus géomorphologiques, le potentiel d'érosion et la localisation des mines à ciel ouvert du bassin de la rivière Jilț (comme source probable de lignite) ont fourni une image globale sur le système de production des sédiments du bassin de la Jiu.

# Chapitre 5.

## Fonctionnement hydrologique du bassin de la rivière Jiu

<b>5.1. Comment les débits sont-ils obtenus ?</b> .....	194
5.1.1. Jeu de données hydrologiques utilisées.....	194
5.1.2. Equipement et protocole de mesure.....	198
5.1.3. Contrôle des données.....	202
5.1.3.1. <i>Les débits liquides</i> .....	202
5.1.3.2. <i>Les débits solides</i> .....	212
5.1.3.3. <i>Précisions sur l'utilisation des séries de débits liquides et solides</i> .....	220
<b>5.2. Variabilité spatio-temporelle des débits liquides</b> .....	221
5.2.1. Echelle multi-annuelle et annuelle.....	221
5.2.1.1. <i>La variabilité des débits moyens multiannuels</i> .....	221
5.2.1.2. <i>La variabilité des débits maximaux multiannuels</i> .....	223
5.2.1.3. <i>La tendance des débits moyens multiannuels</i> .....	225
5.2.1.4. <i>La tendance des débits maximaux annuels</i> .....	229
5.2.1.5. <i>La variabilité des débits liquides moyens et maximaux annuels sur la Jiu</i> .....	233
5.2.1.6. <i>Les relations entre les débits multi-annuels et les caractéristiques du bassin de la rivière Jiu</i> .....	238
5.2.2. Echelle mensuelle et saisonnière.....	242
5.2.2.1. <i>La variation intra-annuelle des débits moyens mensuels</i> .....	242
5.2.2.2. <i>La variabilité inter-annuelle des débits moyens mensuels</i> .....	247
5.2.2.3. <i>La variabilité intra-annuelle des débits maximaux mensuels</i> .....	248
5.2.3. Les crues.....	250
5.2.3.1. <i>Caractéristiques générales des crues</i> .....	251
5.2.3.2. <i>Caractérisation des ondes de crue</i> .....	254
5.2.3.3. <i>Célérité des crues</i> .....	257
<b>5.3. Variabilité spatio-temporelle des débits solides</b> .....	261
5.3.1. La dynamique des débits des alluvions en suspension à l'échelle multi-annuelle.....	261
5.3.2. La dynamique des débits des alluvions en suspension à l'échelle mensuelle et saisonnière.....	266
5.3.3. L'importance de l'industrie du charbon dans la production des alluvions.....	267
5.3.4. Les débits des alluvions en suspension pendant les crues.....	269
5.3.5. L'hystérésis entre le débit liquide et le débit d'alluvions en suspension.....	274
5.3.5.1. <i>L'hystérésis en hydrologie : quelle implication dans le transport des sédiments?</i> .....	274
5.3.5.2. <i>Approche méthodologique</i> .....	276
5.3.5.3. <i>Résultats de l'analyse d'hystérésis</i> .....	277
5.3.6. Les relations entre les débits solides et les paramètres morpho-lithologiques ....	284
5.3.6.1. <i>Approche méthodologique</i> .....	285
5.3.6.2. <i>Résultats</i> .....	287
<b>Synthèse du chapitre</b> .....	290

L'analyse hydrologique est une étape indispensable dans la connaissance des flux hydro-sédimentaires dans un bassin versant. Le but de nos applications hydrologiques, à partir des jeux de données des débits liquides et solides, est de caractériser la variabilité hydrologique à différentes échelles temporelles (mensuelle, saisonnière, annuelle, pluriannuelle). Dans ce chapitre nous envisageons d'analyser des données hydrologiques mises à notre disposition par l'Administration Basinale d'Eaux de la rivière Jiu (ABA Jiu) et par l'Institut d'Hydrologie et Gestion des Eaux (INHGA).

## 5.1. Comment les débits sont-ils obtenus ?

Vérifier la qualité des données hydrologiques utilisées est la première étape de l'analyse hydrologique. Cela consiste à savoir comment les données hydrologiques ont été collectées / mesurées, puis à vérifier le respect des principes de fiabilité et de représentativité temporelle et spatiale. Dans ce qui suit, nous présentons brièvement le protocole de mesure hydrométrique et ensuite nous vérifions la stationnarité, l'homogénéité et les relations amont – aval des flux liquides et solides, à travers des études de cas.

### 5.1.1. Jeu de données hydrologiques utilisées

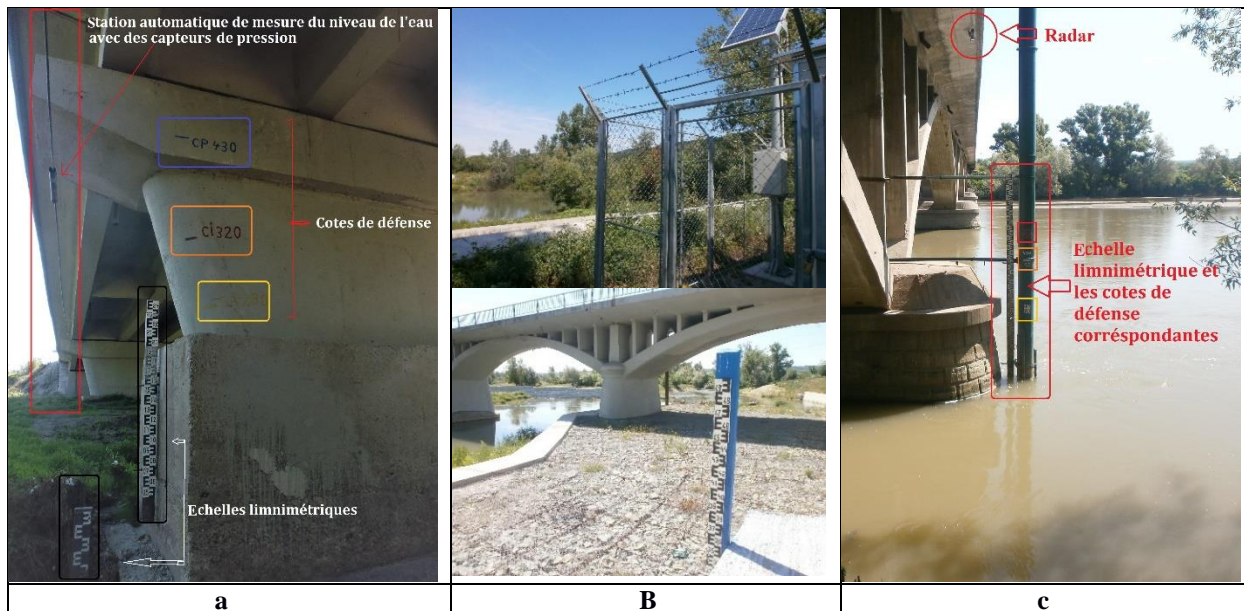
Pour les analyses hydrologiques, plusieurs catégories de données ont été utilisées. La plupart des analyses porte sur *les séries de débits liquides*. Premièrement, nous avons eu à la disposition des *séries de débits liquides moyens journaliers* de toutes les 75 stations hydrométriques (s.h.), existant dans le bassin de la rivière Jiu sur différentes périodes. La densité moyenne du réseau hydrométrique est d'environ une station pour 135 km<sup>2</sup>. En altitude, les stations hydrométriques sont réparties entre 987 m (s.h. Buta sur la rivière Buta, affluent de la Jiu de l'Ouest) et 33 m (s.h. Zăval sur la rivière Jiu, à environ 7 km de l'embouchure).

La plupart des stations hydrométriques sont automatisées (*Figure V.1.a*). Une dizaine d'entre elles (des stations nouvelles sur les petits affluents de la zone montagneuse ou dans les secteurs supérieurs des sous-bassins principaux) ont été mises en fonctionnement par le projet DESWAT<sup>26</sup>. De nombreuses stations hydrométriques intègrent aussi des installations pour le monitoring météorologique (précipitations et température de l'air) – *Figure V.1.b*. Sur la rivière Jiu, la station hydrométrique principale (avec les plus longues séries d'observations aussi) est la station de Podari (*Figure V.1.c*) contrôle l'ensemble du bassin versant de la rivière Jiu. Dans la *Figure V.2*, la répartition spatiale des stations hydrométriques est représentée. Elles sont notées de 1 à 75 en ordre hydrologique.

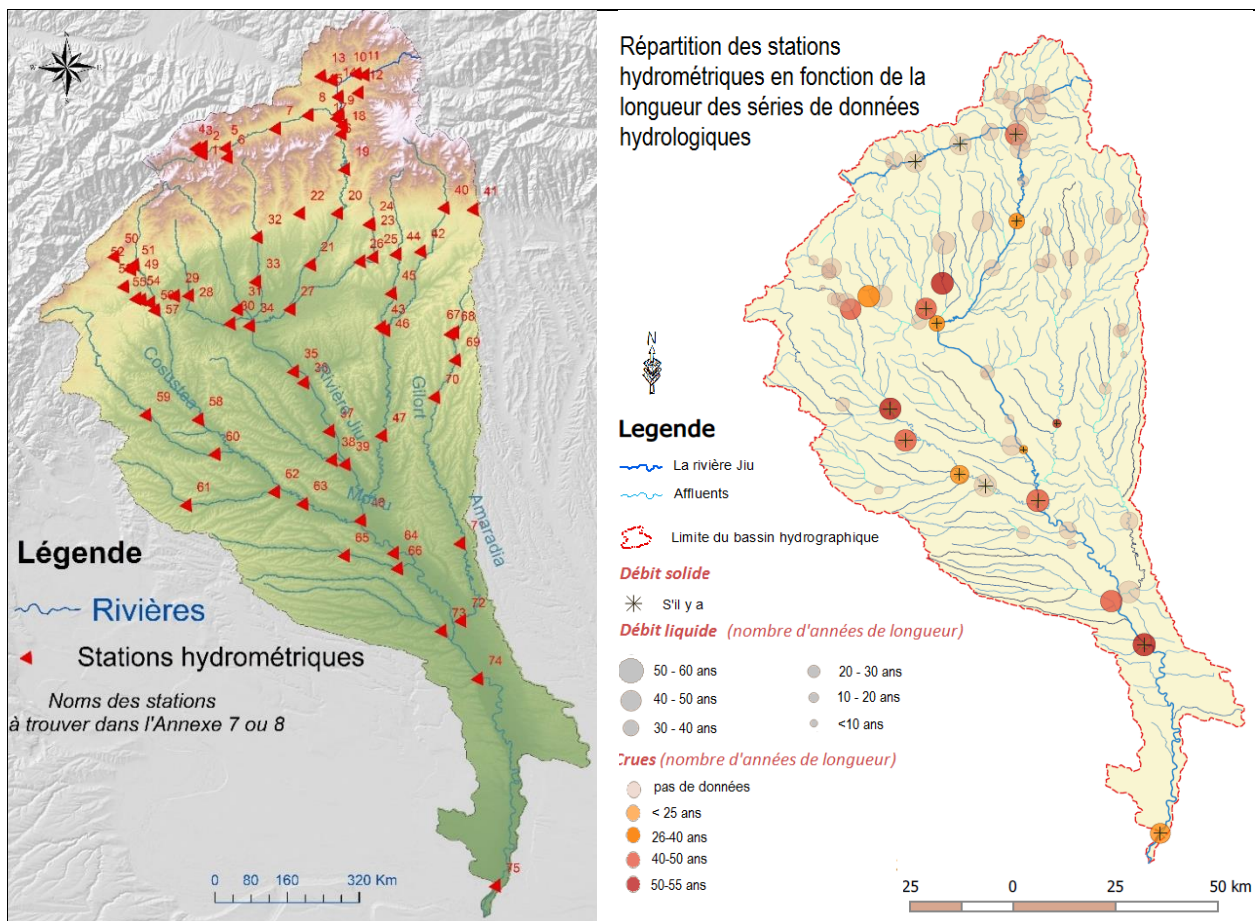
---

<sup>26</sup> DESWAT (Destructive Water Abatement and Control of Water Disasters) - Projet mis en œuvre en 2005 par l'Agence Nationale des Eaux Roumaines pour la modernisation de l'activité d'hydrologie et de la gestion de l'eau



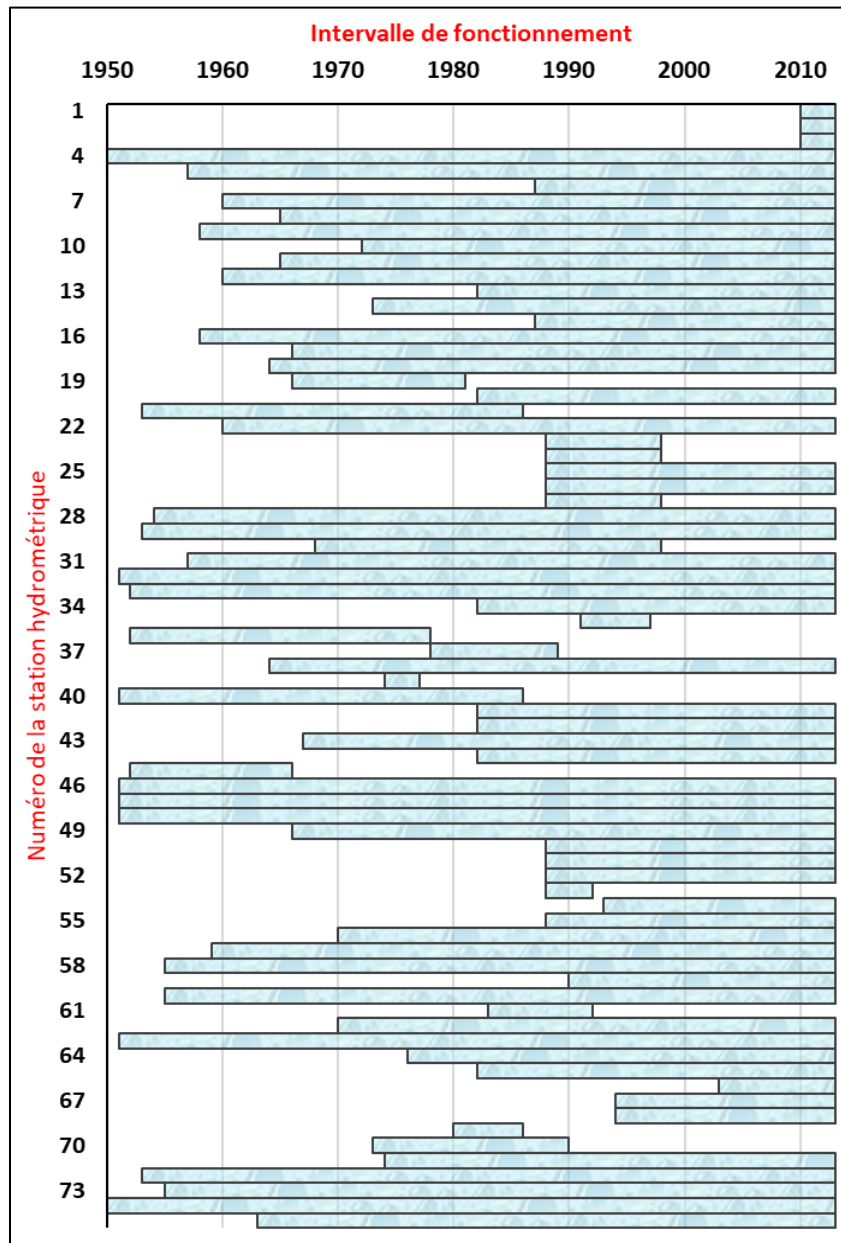


**Figure V.1.** Exemples de stations hydrométriques dans le bassin de la rivière Jiu : **a.** Installation de mesure classique (échelle limnimétrique) et automatique des débits liquides (s.h. de Godinești, r. Tismana) ; **b.** Station pluviométrique près de la station hydrométrique de Răcari, r. Jiu ; **c.** Station hydrométrique de Podari, r. Jiu



**Figure V.2.** La répartition spatiale des stations hydrométriques dans le bassin de la rivière Jiu (les noms des stations sont à trouver dans l'Annexe 8). La station de Podari a le numéro 74.

Les plus importantes, une vingtaine de stations hydrométriques, ont fonctionné en continu depuis les années 1950 (**Figure V.3**), tandis que la plupart des stations ont été mises en fonction au fur et à mesure que l'activité de gestion des bassins versant en Roumanie a été développée. Une autre vingtaine de stations a eu, quand même, une courte période de fonctionnement (quelques décennies). Les unes ont connu des interruptions dans le régime de fonctionnement, tandis que d'autres ont fonctionné sur des périodes différentes en ce qui concerne la mesure des niveaux et des débits liquides.



**Figure V.3.** L'étendue des séries de débits liquides disponibles à chacune des 75 stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu dans la période 1950 - 2013

Dans les **Tableaux A.8.1 et A.8.2**, des **Annexes**, nous présentons une synthèse sur la période de fonctionnement et des principales caractéristiques hydrologiques et morphométriques des stations



hydrométriques du bassin de la rivière Jiu. Les plus longues séries de débits liquides s'étendent sur 64 ans (1950 – 2013) pour les premières stations mises en services au début des années '50 et qui ont fonctionné sans arrêt jusqu'à présent (les s.h. Podari et Filiași sur la Jiu, Fața Motrului sur la Motru, Târgu Cărbunești et Novaci sur la Gilort, et Runcu sur la Jaleș). A partir des débits liquides moyens journaliers, un ensemble de débits caractéristiques ont été calculés et intégrés dans les analyses hydrologiques : *les débits liquides minimaux, moyens et maximaux sur des durées mensuelles, annuelles et multi annuelles*.

Par ailleurs *les débits liquides en crue* ont été utilisés pour certains événements sélectionnés. Pour une vingtaine des stations hydrométriques, les plus grandes crues annuelles ont été inscrites dans les archives de l'Administration Nationale des Eaux Roumaines. Nous avons utilisé une partie des données portant sur ces crues, qui offrent des informations plus précises sur la variation des débits et niveaux correspondants à un pas de temps de moins d'une heure jusqu'à quelques heures.

Troisièmement, nous avons considéré partiellement dans les analyses les *débits des alluvions en suspension*. Ces débits sont mesurés à un nombre plus réduit de stations hydrométriques et moins fréquemment que le débit liquide. *Commentaire sur ce que j'ai surligné en vert : C'est bien trop tôt ici parce qu'on attend avant tout les analyses des données. À effacer ici (pas la peine de conserver parce que tu redis tout ça un peu plus loin. On va détailler le protocole, les instruments et le programme de mesures des matières en suspension dans le chapitre suivant. On mentionne ici seulement le fait que les séries de débits des alluvions en suspensions sont plus difficiles à exploiter à cause de quelques limites :*

(i) Pas toutes les stations hydrométriques disposent de données sur les matières en suspension ; on a pu obtenir des séries pour 22 stations uniquement ;

(ii) La fréquence de mesure des quantités des matières en suspension ne convient pas aux analyses détaillées sur le régime journalier et en crue; en général, 12 - 30 mesures par année se font aux stations hydrométriques, de façon à surprendre toutes les phases d'écoulement de la rivière durant l'année ; il est, donc, très rare que les mesures soient prises pendant toutes les événements de crue, plusieurs jours consécutifs ou le même jour du débit de pointe ;

(iii) Les données portant sur les débits d'alluvions en suspension ont été mises à notre disposition sur des formats difficilement à exploiter (des tableaux sous forme de photographies ou PDFs) ; il en résulte la difficulté de transcrire ou transférer toutes ces valeurs en format électronique et les rendre facilement utilisables pour des analyses statistiques ; nous avons réussi exploiter seulement une partie de ces données, en priorité les débits mensuels et annuels maximaux ;

(iv) Les débits d'alluvions en suspension que nous avons eu à notre disposition couvrent une période de 10 ans (2001 – 2010) pour la plupart des stations ; seulement les stations principales sur la rivière Jiu on a bénéficié des séries plus larges de débits d'alluvions en suspension (1980 – 2010).

A part les données portant sur les débits liquides et d'alluvions en suspension, nous avons aussi utilisé les profils en travers des relevés topographiques à la station hydrométrique de Podari (pour les années avec les plus grandes crues) et les courbes de tarage associées. Ces données ont été obtenues des archives de l'Administration Basinale de la rivière Jiu et de l'Institut National d'Hydrologie et de Gestion des Eaux, ainsi que des publications [Savin, 2003, 2004 et 2008 ; plans de gestion du bassin de la rivière Jiu].

### 5.1.2. Equipement et protocole de mesure

La mesure et le traitement primaire des débits liquides et solides dans le cadre du réseau hydrométrique de la Roumanie se réalise selon la méthodologie développée par l'Institut National d'Hydrologie et de Gestion de l'Eau à travers des manuels d'hydrométrie publiés en plusieurs années (1956, 1977, 1992 et 2013).

Le programme des mesures hydrologiques concerne les niveaux, les débits liquides pour la plupart des stations hydrométriques et les débits d'alluvions en suspension, pour une partie des stations. On détermine les débits liquides en intégrant la vitesse sur la section par la formule suivante :

$$Q = \int_{rive\ gauche}^{rive\ droite} \left[ \int_{fond}^{surface} v dz \right] dy = \int_{section\ A} v dA = \int_{rive\ gauche}^{rive\ droite} \overline{v_{verticale}} dy = \overline{v_{section}} A$$

-  $v$  = la vitesse ponctuelle locale du courant (sa composante dans la direction moyenne amont-aval)

-  $\overline{v_{verticale}}$  = la vitesse moyenne sur une verticale dans la section de mesure,  $\overline{v_{section}}$  est la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section, ces deux valeurs étant des moyennes, elles ne sont pas mesurées mais seulement estimées ou calculées à partir d'une ou de plusieurs mesures ponctuelles de la vitesse locale.

Les dispositifs utilisés pour mesurer la vitesse locale de l'eau [INHGA, 2013] sont les suivants:

- le moulinet/ le micro-moulinet hydrométrique et ses accessoires, qui est le plus couramment utilisé;
- le dispositif électromagnétique Nautilus ;
- l'équipement doppler (ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler).

Les débits journaliers sont obtenus indirectement de la corrélation entre les débits mesurés durant l'année et les niveaux de l'eau correspondant, sur la base de la courbe de tarage. Celle-ci est valable pour des périodes de temps bien définies et peut changer d'une année à l'autre et même dans l'année (notamment durant et après les crues) à cause de la dynamique du lit.

La détermination des débits d'alluvions en suspension par des mesures simultanées de la vitesse de l'eau et de la concentration des matières en suspension dans un certain nombre de points sur la verticale de vitesse, en fonction de la profondeur de l'eau, conformément aux règlements des manuels d'hydrométrie en vigueur. Dans une section transversale d'une rivière, il y a plusieurs types de mesures [INHGA, 2013] :

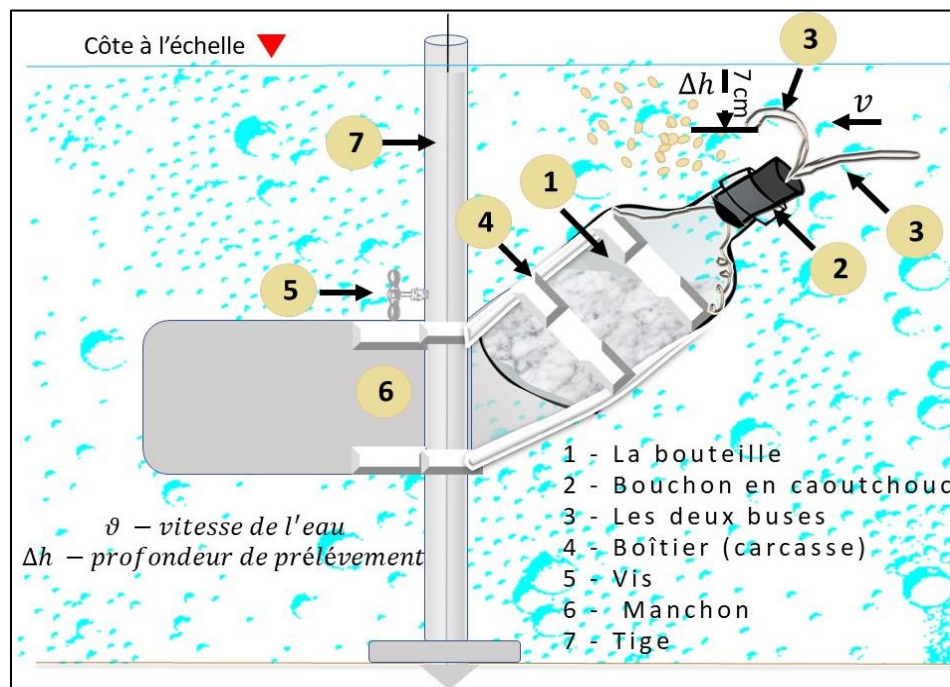
- Complets dans toutes les verticales de vitesse à tous les points standard dans lesquels les vitesses sont mesurées (maximum 5, en fonction de la profondeur de l'eau) ;

- *Simplifiés*, dans les points situés soit à la surface de l'eau, soit à 0,6 fois la profondeur de l'eau, dans toutes les verticales de vitesse, ou sur la surface ;

- *Simples*, seulement sur certains points et verticales près des berges.

Bien que dans certaines stations hydrométriques des appareils de mesure semi-directe de la concentration d'alluvions en suspension (turbidimètres automatiques)<sup>27</sup> aient été introduits dans les dernières années, la méthode classique pratiquée en Roumanie est toujours la plus utilisée. Cela suppose à remplir un récipient avec de l'eau prélevée de la rivière, suivi par la filtration, le séchage du filtre avec les alluvions décantées et son pesage. La quantité d'alluvions est obtenue comme différence entre le poids du filtre avec des alluvions séchées et le poids initial du filtre (sans alluvions). En Roumanie, il y a deux types de récipients utilisés pour collecter l'eau des rivières : *la bouteille* (Figure V.4) et *le bathomètre* (Figure V.5).

La bouteille (Figure V.4) est en verre, avec la capacité d'un litre, à col large, avec un bouchon en caoutchouc englobant 2 tuyaux : un tuyau droit pour l'entrée de l'eau et un tuyau incurvé pour la sortie de l'air [Manuel d'Hydrométrie, 2013].



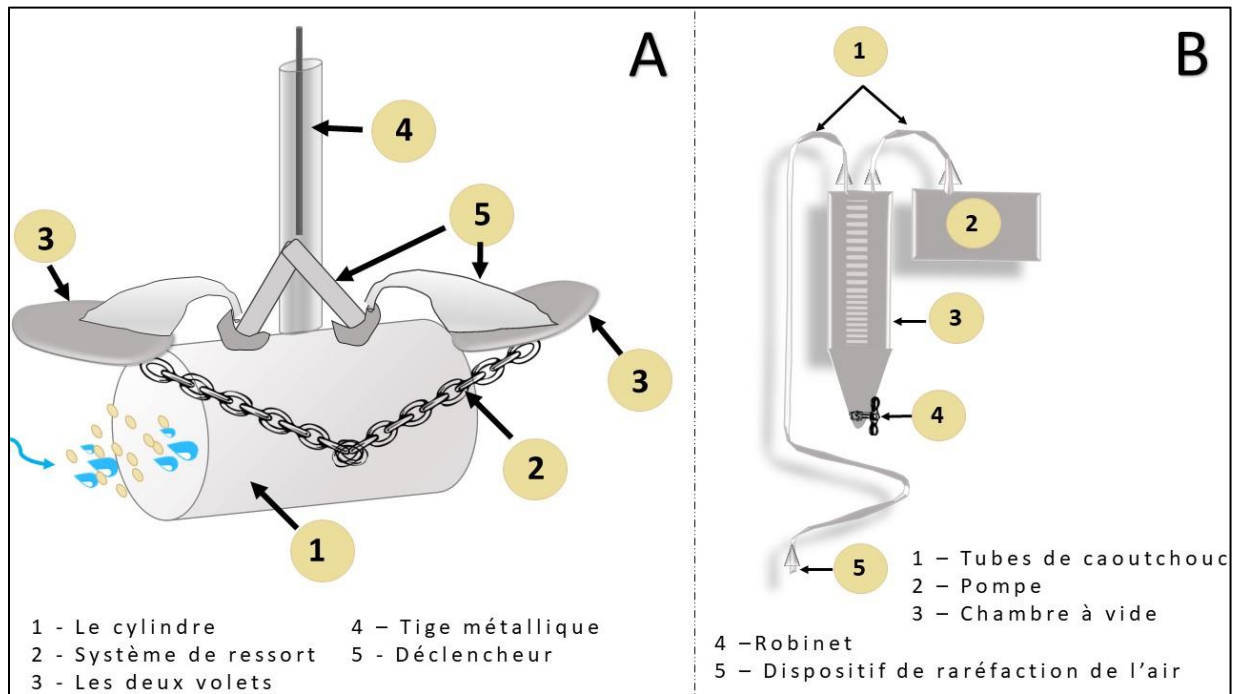
**Figure V.4.** La bouteille de prélèvement des échantillons d'eau de rivière pour la mesure de la concentration en alluvions en suspension (Dessin propre selon l'INHGA, 2013)

La bouteille peut être introduite dans l'eau au moyen d'un boîtier fixé à la tige de la moule ou d'un câble de lest. Le verre est fourni avec 2 paires de tuyaux : un pour des petites vitesses (jusqu'à 1 m·s<sup>-1</sup>) et

<sup>27</sup> Les turbidimètres présentent l'inconvénient des erreurs de transformation des résultats exprimés en concentration massique, avec l'unité de mesure - mg/l.

l'autre pour les vitesses élevées (supérieure à  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). L'appareil est constitué par un récipient cylindrique en métal avec un axe horizontal, muni de vannes à ses deux extrémités, entraînées par des ressorts. Il est introduit dans la rivière aux profondeurs désirées à l'aide d'une tige et l'eau est captée dans le cylindre par la fermeture automatique des deux volets latéraux.

Les bathomètres permettent une récolte rapide ou lente de l'eau. Parmi les *bathomètres rapides* (instantanées), on peut citer le *cylindre à volets* (*Figure V.5.A*).



**Figure V.5.** Le schéma des bathomètres : A – Le bathomètre rapide ; B – Le bathomètre lente à vacuum (Dessin propre selon INHGA, 2013)

Parmi les baromètres lents, le plus utilisé est le baromètre à vacuum (*Figure V.5.B*). Cet appareil consiste en un récipient gradué (chambre à vide ou vacuum de récupération), d'une capacité moyenne de 3 à 6 litres, une pompe (manuelle ou mécanique) pour la raréfaction de l'air dans la chambre à vide et des tubes en caoutchouc. L'ouverture et la fermeture de la chambre à vide et le prélèvement se font au moyen d'un robinet. Le baromètre est enfoncé à la profondeur requise en utilisant les tiges de deux soupapes ouvertes par câbles opérateur. Après avoir rempli le récipient avec de l'eau, celui-ci est fermé brusquement en libérant les verrous des deux câbles.

Pour connaître le flux d'alluvions en suspension ( $R_{[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]}$ ), la partie solide des récipients est séparée par filtration ou centrifugation et ensuite les suspensions sont séchées et pesées ( $M[\text{g}]$ ). Par le rapport entre le poids d'alluvions séchées ( $M$ , en g) contenues dans un récipient et le volume d'eau collectée ( $W$ , en  $\text{cm}^3$ ), la concentration ( $\rho_{[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]}$ ) des suspensions est calculée.

$$\rho = \frac{M}{W} [\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$$

Cette concentration des matières en suspension (**MES** en France) est appelée en Roumanie « turbidité ». Ce terme « turbidité » est plutôt réservé en hydrologie en France aux propriétés optiques du milieu liquide. Afin de mettre en équivalence les deux systèmes de notation et les unités de mesure des deux pays, nous utiliserons désormais la notation MES. Elle peut s'exprimer en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ou  $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ .

Sur la base de la concentration de matières en suspension ( $\rho$ , en  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et le débit liquides (Q, en  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), le débit d'alluvions en suspension (**R**, en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) peut se calculer :

$$\mathbf{R} = 10^{-3} \cdot \mathbf{Q} \cdot \rho$$

En Roumanie, la méthode la plus utilisée pour le calcul des alluvions en suspension est *la méthode analytique*, qui consiste à calculer le débit total d'alluvions en suspension (R) dans une section transversale de la rivière, comme somme des débits partiels s'écoulant entre les verticales de mesure des vitesses. Pour plus de détails sur les calculs, se référer au *Manuel d'Hydrométrie (2013)*.

Compte tenu de la faible fréquence des mesures des débits d'alluvions en suspension (en fonction de l'importance de la rivière et de la section hydrométrique, les mesures variant de 12 à 20-30 par an de telle façon qu'elles couvrent statistiquement les débits les plus courants), une brève discussion sur la manière d'obtenir des débits journaliers d'alluvions en suspension, est nécessaire.

Le plus fréquemment en Roumanie, la série des débits journaliers d'alluvions en suspension sont obtenus indirectement de la corrélation entre les débits liquides (Q) et d'alluvions en suspension (R), mesurées effectivement durant l'année :  $R = f(Q)$ . Cette corrélation est utilisée à juste titre aux débits courants mais aussi en crue. Toutefois, la plupart des alluvions en suspension sont transités pendant les crues, qui occupent moins de 5% de l'année [Savin, 2006]. Durant les crues, la pratique est d'extrapoler la courbe de tarage des débits liquides pour obtenir les débits solides en suspension correspondant à ces valeurs extrêmes. Dans ces conditions, on reste dans l'incertitude si les mesurent réelles des matières en suspension correspondent à celles dérivées à partir des débits liquides.

Étant donnée cette manière indirecte de calcul des débits d'alluvions en suspension, nous ne les utiliserons qu'avec précaution, en tenant compte des incertitudes et possibles erreurs.

Le problème de l'estimation indirecte de la quantité des alluvions en suspension en absence des mesures est insuffisamment élucidé en raison de facteurs hydrauliques, hydromorphologiques inconnus ou qui dérivent des erreurs inhérentes de mesure [Diaconu et Lăzărescu, 1970 ; Diaconu, 1999 ; Musy, 2005 ; Bescond *et al.*, 2018]. Afin de surmonter la perte d'informations de ce côté pratique, les hydrologues roumains considèrent qu'il est nécessaire d'effectuer autant de mesures directes que possible à la fois pour les alluvions en suspension et pour le débit liquide.

Sur la base des débits d'alluvions en suspension (R), les volumes d'alluvions (W) peuvent être calculés pour une période de temps donnée. Par exemple, le volume solide multi-annuel est obtenu :

$$\mathbf{W} = \mathbf{Q} \cdot \rho \cdot \mathbf{T} \text{ ou bien } \mathbf{W} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}$$



où  $W$  – le volume annuel des alluvions en suspension transportés (mil. tonnes);  $Q$  – le débit liquide moyen d'une rivière dans la section considérée [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ];  $\rho$  – la turbidité moyenne annuelle (ou les MES) [ $g \cdot m^{-3}$ ];  $T$  – le temps (les nombre de secondes dans une année).

Un autre problème concerne le lien disproportionné entre la taille d'un bassin versant correspondant à une station de mesure et la quantité d'alluvions exportées. Certes, la concentration des matières en suspension d'une rivière est très variable au même point et en travers de la section hydrométrique. Sur la profondeur, la concentration des matières en suspension augmente généralement de la superficie jusqu'au fond, la répartition étant très différente, en fonction de la géométrie du cours d'eau et la granulométrie du lit de la rivière, ainsi que la composition du fond et des berges [Musy et Higy, 2010].

Pour comparer les quantités d'alluvions des rivières et bassins de différentes tailles, l'utilisation du volume d'alluvions en suspension ( $W_{an}$ , en  $t \cdot an^{-1}$ ) pondéré par la superficie du bassin versant ( $A$ , en ha) est fréquemment utilisé ( $SYr$ ). Ce paramètre donne un aperçu du taux d'érosion et il est généralement exprimé en  $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ .

$$SYr = \frac{W_{an}}{A} [t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}]$$

### 5.1.3. Contrôle des données

L'emploi des séries de données hydrologiques dans des analyses de variabilité temporelle requiert leur contrôle basé sur la connaissance au préalable des caractéristiques statistiques de base à long terme et la vérification des certaines hypothèses, telles que l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité [Chebana *et al.*, 2010]. Etant donnée la longueur différente des séries de débits liquides et solides disponibles pour notre recherche (débits liquides sur toute la période de fonctionnement des stations hydrométriques ; débits solides pour la plupart des stations sur 10 ans de 2001 à 2010), le contrôle de ces débits a été réalisée d'une manière différente.

#### 5.1.3.1. Les débits liquides

Les débits liquides s'étendent sur plusieurs décennies, ce qui soulève le problème de la stationnarité et de l'homogénéité des séries temporelles. Dans la littérature, l'étape consistant à vérifier les hypothèses de stationnarité et d'homogénéité dans les analyses de tendance temporelle des séries hydrologiques est généralement négligée dans le contexte multivarié [van Gelder *et al.*, 2007]. Les analyses hydrologiques sont rarement centrées sur plus d'une direction du système de changement, en attribuant généralement aux facteurs climatiques les perturbations des flux liquides. Nous considérons que cette optique peut être particulièrement dangereuse pour les bassins versants où les ressources en eau ont été soumises à des pressions humaines. C'est pourquoi, avant toute analyse statistique, il convient de s'assurer de la validité de la série de données, en vérifiant/ testant leur comportement statistique (homogénéité, stationnarité etc), qui peut être perturbé aussi par des facteurs naturels (climatiques) qu'anthropiques.

Le test *d'homogénéité* vérifie s'il y a une rupture dans les données, c'est-à-dire s'il y a un moment (jour, année) à partir duquel la moyenne change [Chebana *et al.*, 2010 ; Harle, 2016]. Il s'agit d'un test fondamental dans l'analyse statistique hydrologique [Kang et Yusof 2012; Qin *et al.*, 2009]. En général, lorsque la série de données hydrologiques est homogène, cela signifie que les données ont été enregistrés avec des instruments/ techniques similaires ou qu'aucun facteur externe important n'est intervenu pour modifier le régime de variabilité de la série de données [Kang et Yusof, 2012 ; Obreja, 2011].

La littérature propose plusieurs méthodes pour tester l'homogénéité des séries chronologiques hydrologiques, telles que le test d'homogénéité normale (SNHT), le test de Buishand et le test de Pettitt [Pettitt, 1979 ; Buishand, 1982; Chiu et Wang, 2009; Firat *et al.*, 2010; Rocha *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2007]. Nous avons choisi de tester cette caractéristique en utilisant le test proposé par Pettitt (1979). C'est un test non-paramétrique utilisé pour identifier des changements dans la variabilité des séries temporelles en ce qui concerne la présence des points de rupture dans la moyenne, indiquant un possible changement du régime/ de la tendance. Au fil du temps, ce test a été appliqué non seulement pour détecter les changements dans le régime hydrologique, mais il se prête aussi pour des données climatiques [Verstraeten *et al.*, 2006 ; Busuioc *et al.*, 2010].

L'avantage du test de Pettitt est qu'il ne nécessite aucune supposition sur la distribution des données. Ce test est une adaptation du test Mann-Whitney, qui est fondé sur des classements/hierarchies, permettant d'identifier le moment temporel quand le changement se produit [Beaulieu *et al.*, 2007]. Lorsqu'on vérifie l'homogénéité d'une série temporelle, on pose les hypothèses suivantes :

- $H_0$ : les données sont homogènes
- $H_a$ : Il y a une date pour laquelle se produit un changement abrupt des paramètres statistiques principaux (moyenne, variance) dans la série

L'interprétation du test est la suivante : si la valeur p calculée est plus grande que le niveau de signification  $\alpha=0,05$ , on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$ , mais si la valeur p est plus petite que le niveau de signification  $\alpha=0.05$ , il faut rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  et accepter l'hypothèse alternative  $H_a$ . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  même si elle est vraie est de moins de donné en pourcentage (de moins de 0.01%) et la valeur **p** est calculée avec 10000 de simulations Monte Carlo.

*La stationnarité* signifie que les propriétés statistiques d'un processus générant une série temporelle ne changent pas dans le temps [Chebana *et al.*, 2010]. Cela ne suppose pas que la série ne change pas avec le temps, mais simplement que la façon dont elle change n'est pas dépendante du temps. L'équivalent algébrique est donc une fonction linéaire dont la valeur change au fur et à mesure que la variable «  $x$  » grandit, mais la façon dont elle change reste constante (sa pente est constante) [Priestley et Subba, 1969]. D'autres définitions indiquent qu'une série temporelle stationnaire est une série dont les propriétés statistiques telles que la moyenne, la variance, l'autocorrélation, etc. sont toutes constantes dans le temps.

Ces séries temporelles sont appelées stationnaires de second ordre. Ainsi, chaque fois que nous parlons de stationnarité, nous entendons la stationnarité de deuxième ordre, alors que la stationnarité stricte (ou la stationnarité du premier ordre) est la forme de stationnarité la plus forte. Cela implique que la distribution statistique conjointe de toute collection de variables temporelles ne dépend jamais du temps. Ainsi, la moyenne, la variance et tout moment d'une variable sont les mêmes, quelle que soit la variable choisie [Shumway et Stoffer, 2011].

Dans le cas des séries temporelles hydrologiques, il est suffisant de vérifier si les caractéristiques statistiques de base (la moyenne, la variance) ne varient pas dans le temps. Bien sûr, dans des processus naturels comme le régime hydrologique d'une rivière, la moyenne de chaque année est forcément différente, mais ce petit changement d'une année à l'autre est normal et ne peut pas être considéré comme marquant un régime non-stationnaire.

Dans la recherche hydrologique, le concept formel de stationnarité est généralement remplacé par le concept pratique de l'«absence de la tendance» et de l'homogénéité, c'est-à-dire que, dans la pratique habituelle, les données sans tendance et homogènes sont donc considérées comme stationnaires [Adeloye et Montaseri, 2002; Ondo *et al.*, 1997].

L'identification d'une série comme étant non-stationnaire permet ensuite d'étudier l'origine de la non-stationnarité. Selon le test de stationnarité que nous utilisons, il existe deux approches différentes : certains tests considèrent l'hypothèse nulle  $H_0$  que la série est stationnaire (test de KPSS, test de Leybourne et McCabe), tandis que pour d'autres tests, l'hypothèse nulle est, au contraire, que la série n'est pas immobile (test de Dickey-Fuller, test de Phillips-Perron, test DF-GLS).

Dans notre analyse, nous avons utilisé le test de Dickey - Fuller, qui montre une tendance temporelle si la série se révèle non stationnaire. Ce test a été développé par Dickey et Fuller (1979) afin d'identifier l'existence d'une racine unitaire dans une série temporelle dans laquelle on pense qu'il y a une composante autorégressive du premier ordre, qui pourrait aussi être une composante temporelle liée de manière linéaire au temps. Pour chaque station hydrométrique, nous avons mis en miroir les résultats de l'analyse d'homogénéité (avec le test de Pettitt) et de stationnarité (avec le test de Dickey et Fuller). Si le test de Pettitt n'a montré aucune rupture, mais si selon le test de Dickey et Fuller la série en cause est non-stationnaire, nous avons vérifié ces derniers résultats en employant un deuxième test de stationnarité, celui de Phillips - Perron. Dans le cas contraire de non-concordance entre les tests d'homogénéité (Pettitt) et de stationnarité (Dickey et Fuller), c'est-à-dire quand il y avait un point de rupture, mais aucune situation de manque de stationnarité n'a été identifiée, nous avons doublé la vérification en employant un deuxième test de stationnarité (celui de Phillips - Perron).

Les tests Dickey-Fuller [DF (interception+tendance)] et de Phillips - Perron supposent les hypothèses suivantes :

- $H_0$ : il y a une racine unitaire pour les séries
- $H_a$ : il n'y a pas de racine unitaire pour les séries

Si la valeur  $p$  calculée est inférieure au niveau de signification  $\alpha=0,05$ , il faut rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  et accepter l'hypothèse alternative  $H_a$ . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$ , même si elle est vraie, est de moins de 0,16% [Dickey et Fuller, 1979].

L'**indépendance** est la troisième hypothèse que l'on doit vérifier avant d'analyser les séries chronologiques. L'indépendance est évaluée dans un prochain chapitre. Juste pour anticiper, nous avons généralement utilisé le test d'indépendance du Chi-Square pour déterminer s'il existait une relation significative entre les variables hydrologiques (principalement le débit moyen à différentes échelles) et des facteurs environnementaux susceptibles d'influencer le débit, tels que l'altitude, les paramètres morphométriques des bassins versants, les précipitations, etc.

Nous avons testé l'homogénéité et la stationnarité des séries de débits liquides annuels de 56 stations hydrométriques parmi les 75 au total, qui ont été choisies selon les critères suivants : **a.** que les séries soient aussi longues que possible (les séries des stations fonctionnant depuis des dizaines d'années ont été privilégiées) ; **b.** que la station fonctionne encore (la dernière année de la série devrait être 2013) ; **c.** que la station soit localisée sur une rivière d'intérêt, dans une région où des facteurs environnementaux et anthropiques peuvent impacter les flux liquides (des aménagements hydrotechniques, des rivières en karst etc).

- Pour la stationnarité, nous pouvons trouver quatre situations possibles, chacune avec son niveau de notation :

- Si  $Y$  et aucune rupture n'a pas été identifiée – la série a été stationnaire ;
- Si  $Y$  et une année de rupture a été trouvée – le test de stationnarité de Dickey – Fuller a dû être confirmé par le résultat du second test, celui de Phillips – Perron ;
- Si  $N$  et que le résultat de l'analyse d'homogénéité a été statistiquement significatif – on a été sûr que la série n'a pas été homogène et stationnaire et il n'y a pas eu besoin du test de Phillips – Perron pour une seconde analyse ;
- Si  $N$  et que le résultat de l'analyse d'homogénéité n'a pas été statistiquement significatif – la non-stationnarité et l'année de rupture n'ont pas été considérées sûres et il y a eu besoin d'une confirmation de la non-stationnarité par le test de Phillips – Perron ;

Les résultats complets de l'analyse de contrôle des séries de débits liquides sont résumés dans le **Tableau V.1**. Les paramètres statistiques calculés sont :

**Tableau V.1.** Sommaire des résultats obtenus à la base des tests statistiques d'homogénéité et stationnarité

No	Station hydro	Rivière	Période de mesure	Stationnarité (DF, PP)	Résultats du test Pettitt			
					Année de rupture (changement du trend)	Statistique $p$	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) avant rupture	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) après rupture
4	Lazăr	Lazăr	1975 - 2013	Y				
5	Câmpu lui Neag	Jiu de l'Ouest	1957 - 2013	Y - N	1982	0.00001	6.079	12.744
6	Valea de Pești	Valea de Pești	1987 - 2013	N	1997	0.03	0.661	1.109
7	Bărbăneți	Jiu de l'Ouest	1954 - 2013	N	1982		7.764	6.456
8	Vulcan	Merișoara	1965 - 2013	Y				
9	Iscroni	Jiu de l'Ouest	1955 - 2013	N - N	1981		11.41	9.353
10	Lonea	Jiu de l'Est	1972 - 2013	Y - N	2000	0.037	2.472	1.871
11	Lonea Taia	Taia	1965 - 2013	N	1982	0.00001	2.026	1.278
12	Jieț	Jieț	1960 - 2013	N	1977	0.0001	2.253	1.197
13	Pestera Bolii	Jupâneasa	1983-2013	Y				
14	Dărănești	Bănița	1974 - 2013	Y				
15	Petroșani	Maleia	1987- 2013	Y				
16	Livezeni	Jiu de l'Est	1958 - 2013	N	1981	0.021	8.756	7.188
17	Strâmbuta	Izvor	1966 - 2013	N				
18	Polatiștea	Polatiștea	1964 - 2013	Y				
20	Sadu	Jiu	1982 - 2013	Y - Y	2003		18.732	24.454
22	Vaidei	Șușița	1960 - 2013	Y - Y	1981	0.001	2.247	1.712
25	Ohaba	Amaradia Pietroasă	1988 - 2013	Y				
26	Balanesti	Gruiu	1988 - 2013	Y				
28	Godinești	Tismana	1954 - 2013	N	1983	0.0001	1,742	9.354
29	Celei	Orlea	1953 - 2013	N	1981		2.443	1.456
30	Câlnic	Tismana	1968 - 1998	N	1983	0.0001	6.079	12.744
31	Telești	Bistrița	1957 - 2013	Y - Y	1981			
32	Runcu	Jaleș	1951 - 2013	Y - Y	1983			
33	Stolojani	Jaleș	1952 - 2013	Y - N	1977	0.001	4.858	3.458
34	Rovinari	Jiu	1982 - 2013	Y - Y	2003			
38	Turceni	Jilț	1964 - 2013	Y				
41	Baia de Fier	Pârâul Galben	1982 - 2013	Y				
42	Ciocadia	Ciocadia	1982 - 2013	Y				
43	Târgu Cărbunești	Gilort	1952 - 2013	Y - N	1981			
44	Sacelu	Blahnița	1982 - 2013	Y				
46	Târgu Cărbunești	Blahnița	1967 - 2013	Y				
47	Turburea		1952 - 2013	Y - N	1981	0.0001	12.461	9.513
48	Filiași	Jiu	1951 - 2013	N	1981		70.656	58.842
49	Closani	Motru	1966 - 2013	N	1983	0.00001	3.727	0.913
51	Motru Sec	Motru Sec	1988 - 2013	Y				
52	Motrușor	Motrușor	1988 - 2013	Y				
54	Baia de Aramă	Bulba	1993 - 2013	Y				
55	Brebina	Brebina	1988 - 2013	Y				
56	Tarnița	Brebina	1970 - 2013	Y				
57	Târmigani	Motru	1959 - 2013	N	1983	0.0001	8.384	4.97
58	Broșteni	Motru	1955 - 2013	Y - Y	1984			
59	Sisesti	Coșuștea	1990 - 2013	Y				
60	Corcova	Coșuștea	1955 - 2013	N	1984		3.826	2.839



62	Strehaia	Hușnița	1970 - 2013	Y - N	1999	1.173	0.598
63	Fața Motrului	Motru	1951 - 2013	N	1983	15.524	10.634
64	Răcari	Jiu	1976 - 2013	Y - Y	2003		
65	Argetoaia	Argetoaia	1982 - 2003	Y			
66	Scăiești	Argetoaia	2003 - 2013	Y			
67	Bustuchin	Amaradia	1994 - 2013	N	2006	0.123	0.049
68	Pojaru	Poienita	1994 - 2013	Y			
71	Negoiești	Amaradia	1974 - 2013	Y			
72	Albești	Amaradia	1953 - 2013	N	1984	0.007	2.669
73	Breasta	Raznic	1955 - 2013	N	1966	1.28	0.637
74	Podari	Jiu	1950 - 2013	N	1977	0.001	93.803
75	Zăval	Jiu	1963 - 2013	Y - Y	1992		

- L'année de rupture (si trouvée) ; là où l'année est marquée en rouge, le niveau de significativité statistique n'a pas été considéré de confiance pour être surs du résultat ;

- La significativité statistique ( $p$ ), si la valeur était inférieure au niveau  $\alpha=0,05$  ;

- Le débit moyen interannuel dans la période avant la rupture et après la rupture et les principaux résultats de l'application des tests de Pettitt et Dickey – Fuller pour toutes les 56 stations étudiées<sup>28</sup>.

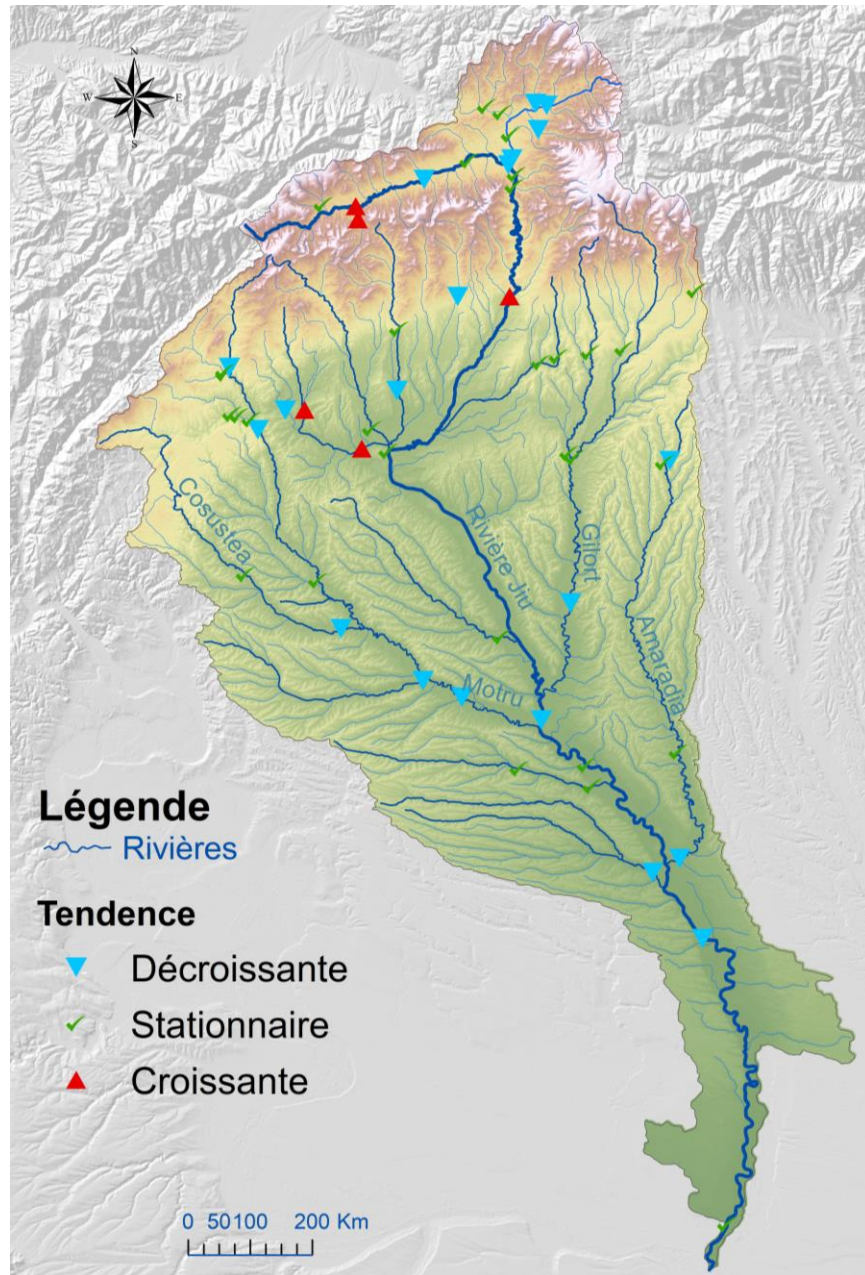
On a identifié de différentes situations concernant l'homogénéité des séries temporelles. Sur le total des 56 stations hydrométriques analysées, 32 ont présenté des ruptures et, par conséquent, leurs séries de débits auraient dû être non-stationnaires. En fait, l'année de rupture pour 15 de ces 32 stations a été un résultat sans niveau de significativité statistique, ce qui a coïncidé aussi pour la plupart avec un résultat positif du test de stationnarité. Cela a posé un problème dans la représentation finale de ces stations sur la carte de la **Figure V.6**, d'où la nécessité de vérifier la stationnarité avec le second test, de Phillips – Perron.

La plupart des séries ont enregistré une rupture marquée par une décroissance dans les années 1980, particulièrement les stations influencées par la construction des ouvrages hydrotechniques du bassin de la rivière Motru et les stations de la rivière Jiu en aval des secteurs aménagés. Pour la rivière Tismana, au contraire, dans les mêmes années, le débit s'est triplé, conséquence de la prise de l'eau du bassin des rivières Motru, Cerna et Valea Mare (qui a d'ailleurs disparu). La majorité des stations avec des résultats d'homogénéité (dont les années de ruptures sont considérées correctes) statistiquement significatifs sont localisées soit dans le secteur supérieur du bassin de la rivière Jiu (Câmpu lui Neag, Valea de Pești, Lonea), soit dans les sous-bassins de la Tismana et de la Motru, dont l'écoulement a été fortement influencé (mais au sens contraire) par le même aménagement hydrotechnique, le complexe hydro énergétique Cerna – Motru – Tismana). Localement, d'autres stations ont présenté des ruptures valables du point de vue

<sup>28</sup> On se souvient que les stations hydrométriques ont été numérotées en fonction de leur ordre hydrologique et elles apparaissent dans le tableau en fonction de leur localisation dans le bassin versant, de l'amont vers l'aval.

statistique (sur la rivière Gilort, sur la rivière Amaradia, ou sur la rivière Șușița), mais pas avec des différences notables entre les débits moyens dans les deux périodes. Pour ces autres stations, le facteur naturel (des possibles changements climatiques qu'on ne peut pas prouver ici) a dû avoir joué le plus.

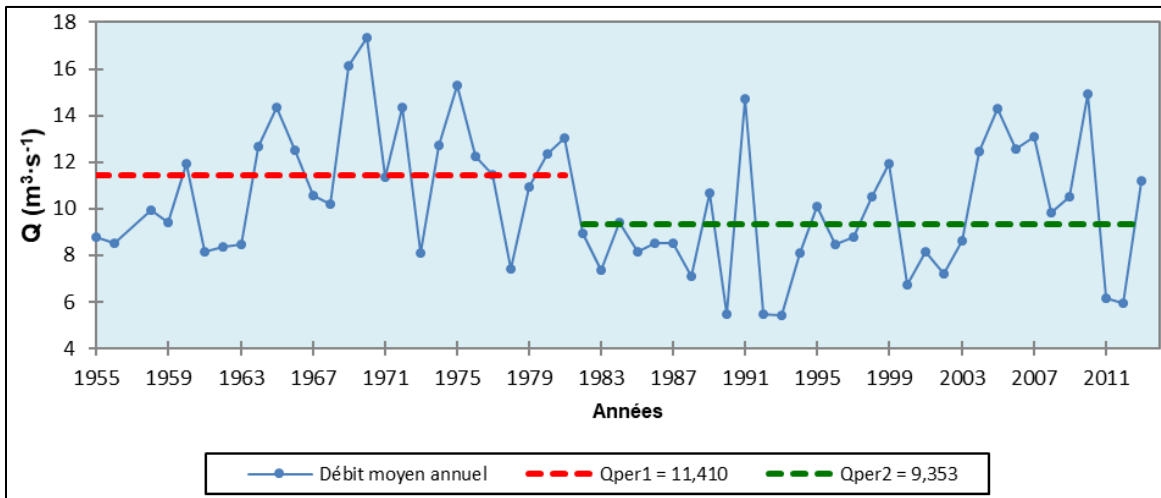
Les résultats des analyses portant sur l'homogénéité et la stationnarité des séries des débits liquides annuelles dans le bassin versant de la Jiu ont été synthétisées dans la **Figure V.6**.



**Figure V.6.** Résultats des tests de stationnarité et homogénéité pour les 56 stations hydrométriques étudiées (à la base des séries de débits liquides annuels). Les 3 situations d'homogénéité et stationnarité ont été représentées de la manière suivante : série stationnaire (symbole : coche vert) ; série à tendance de croissance (symbole : flèche rouge orientée vers le haut) ; série à tendance de décroissance (symbole : flèche bleue orientée vers le bas)

Le long de la rivière Jiu, l'évolution des débits a présenté un comportement différent à l'échelle multi-annuelle. Dans le secteur amont, les stations hydrométriques ont des ruptures dans le début des années '80, mais pas toutes avec une significativité statistique. Ce scénario autour de l'année 1981 se répète pour la station Filiași aussi. Entre Iscroni et Filiași, les stations de Sadu et Rovinari semblent avoir des ruptures dans les séries de débits plus tard, en 2003, mais ce résultat n'est pas confirmé par tous les tests et par le niveau de significativité statistique. Entre Filiași et Podari, la station Răcari s'intercale aussi avec une rupture en 2003, qu'on ne peut pas encore expliquer, alors qu'à Podari, la rupture s'est produite le plus tôt, en 1977, comme sur les rivières Jieț et Runcu. Nous n'avons pas tous les éléments pour apporter des réponses autour de ces résultats, mais on reprend quelques-uns sur les affluents qu'on connaît mieux en ce qui concerne les possibles causes de nature anthropique de leur changement de trend.

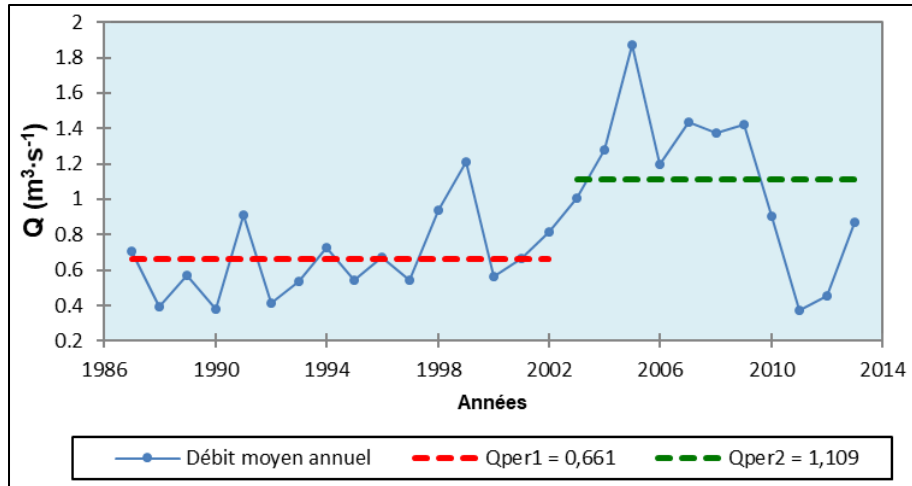
A la station d'Isroni sur la rivière Jiu de l'Ouest la série des débits liquides moyens annuels est homogène, avec la moyenne interannuelle d'environ  $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (**Figure V.7**). Cette station se trouve, toutefois, près de la confluence des deux branches de la rivière Jiu où l'influence des activités minières dans la Dépression de Petroșani et des aménagements pour assurer les besoins en eau de la population et de l'industrie peuvent influencer les débits.



**Figure V.7.** Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique d'Isroni, sur la rivière Jiu de l'Ouest (période d'analyse 1955 – 2013)

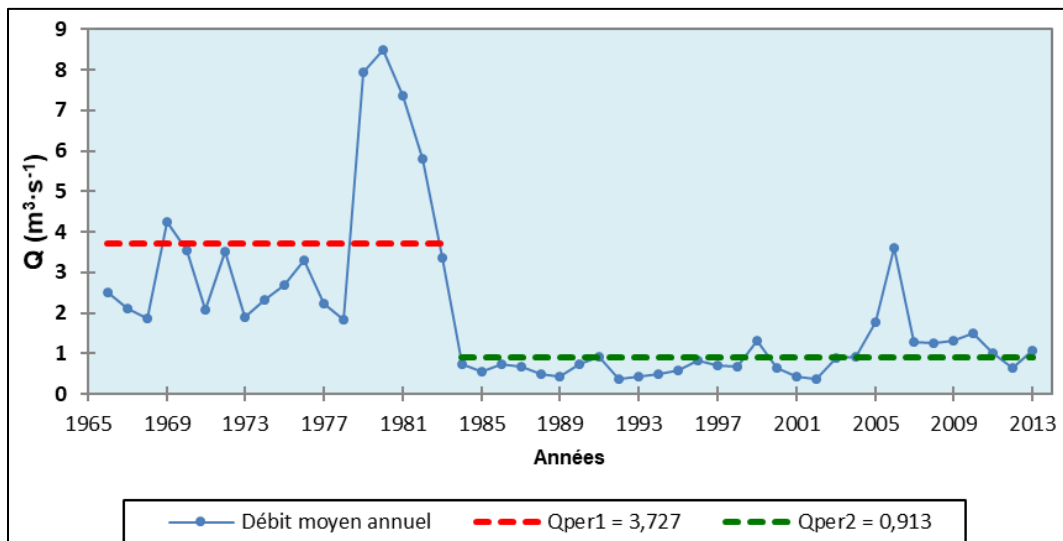
Nous avons vérifié les résultats avec le Test d'Homogénéité Standard Normal (SNHT) et avec le test de stationnarité de Phillips-Perron [PP(interception+tendance)], qui montrent que la série n'est pas stationnaire, mais aucun point de rupture n'a pas été identifié.

Dans le cas de la station Valea de Pești, sur la rivière homonyme (affluent de droite de la Jiu de l'Ouest), la construction d'un grand réservoir a changé l'homogénéité de la série, engendrant un point de rupture au début de l'année 2000, suivie par une augmentation des débits (**Figure V.8**).



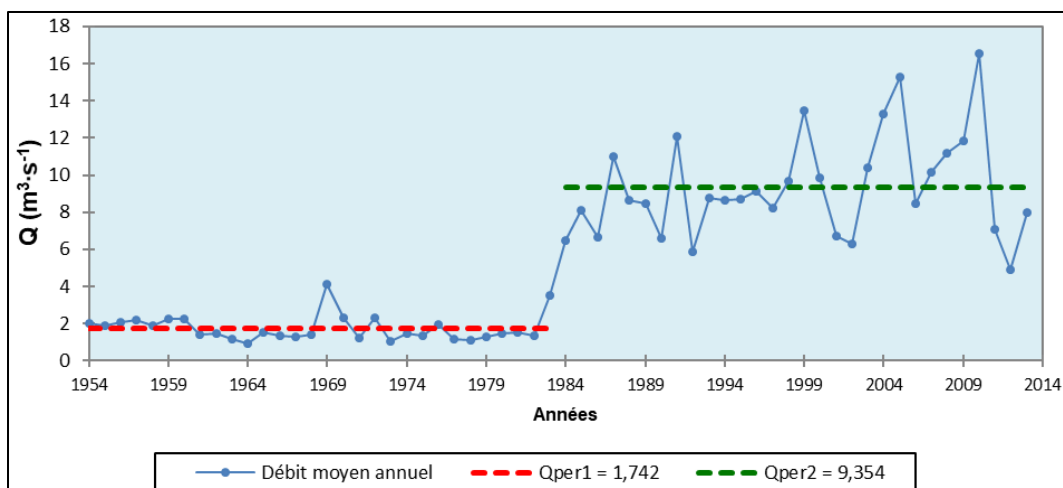
**Figure V.8.** Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Valea de Pești, la rivière Valea de Pești (période d’analyse 1987 – 2013)

Un autre exemple est celui de la rivière Motru à la station de Closani (**Figure V.9**), située dans une région karstique, où une baisse très forte des débits est survenue en 1983 après la mise en fonctionnement de la première hydrocentrale du complexe énergétique Valea Mare (en 1978), qui reçoit de l’eau de la rivière Motru, pour alimenter le réservoir Valea lui Iovan.



**Figure V.9.** Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Closani, la rivière Motru (période d’analyse 1966 – 2013)

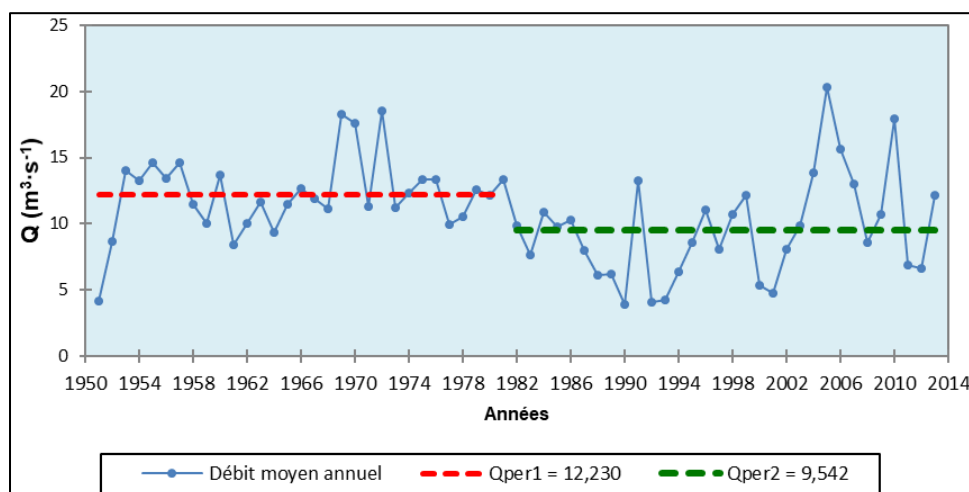
Dans le cas de la rivière Tismana, à la station de Godinești, le débit moyen multi-annuel a augmenté de 5 fois après 1983, par rapport à celui d’avant, à cause des réservoirs situés en amont (**Figure V.10**).



**Figure V.10.** Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Godinești, rivière Tismana. Homogénéité interrompue en 1984 (période d’analyse 1954 – 2013)

Les ruptures identifiées dans les exemples précédents ainsi que dans le cas d’autres stations sur les rivières Runcu, Motru, Tismana sont principalement liées aux aménagements anthropiques. Le plus grand complexe hydrotechnique de la zone est Valea Mare, construit entre 1971 et 1973 pour alimenter les villes industrielles en aval de Târgu Jiu. Les caractéristiques des ouvrages (barrages et dérivations d’eau) sont présentées dans les *Annexes 5* et *6*. La conséquence de ces aménagements sont diverses, car ils peuvent changer la dynamique des débits liquides mais aussi celle des flux sédimentaires.

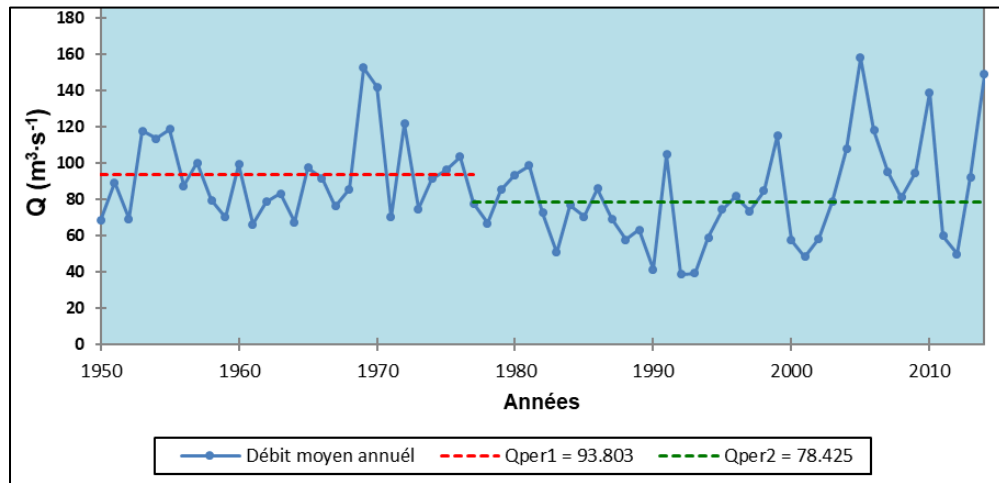
Dans les cas où il n’y a pas d’aménagements (par exemple dans les bassins versant des rivières Gilort, Amaradia, Hușnița), les changements dans la moyenne pourraient être dus aux changements climatiques, mais aussi à d’autres causes (par exemple modification de l’endroit de la section de mesure). Un exemple est celui de la station Turburea (sur la rivière Gilort), qui présente une baisse de la moyenne autour des années ‘80 (**Figure V.11**). Une décroissance d’environ  $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a été identifiée.



**Figure V.11.** Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Turburea, rivière Gilort (période d’analyse 1951 – 2013)



Dans le cas de la rivière Jiu, à la s.h. de Podari, la série de débits liquides annuels présente une rupture au niveau de l'année 1977, probablement à cause du fait que la station de Podari se trouve en aval des toutes les perturbations affectant les débits provenant de ses secteurs supérieurs et c'est à ce moment quand la différence la plus marquée entre les périodes d'avant et d'après peut s'observer. Cette situation est probablement conséquence de l'effet de dérivation de l'eau en amont dans les réservoirs qui ont été mis en œuvre généralement dans les années '80.



**Figure V.12.** Variabilité des débits moyens annuels à la station hydrométrique de Podari, rivière Jiu (période d'analyse 1950 – 2013)

D'autres exemples des résultats des tests d'homogénéité et de stationnarité pour les stations du bassin de la rivière Jiu sont présentés dans *l'Annexe 9*.

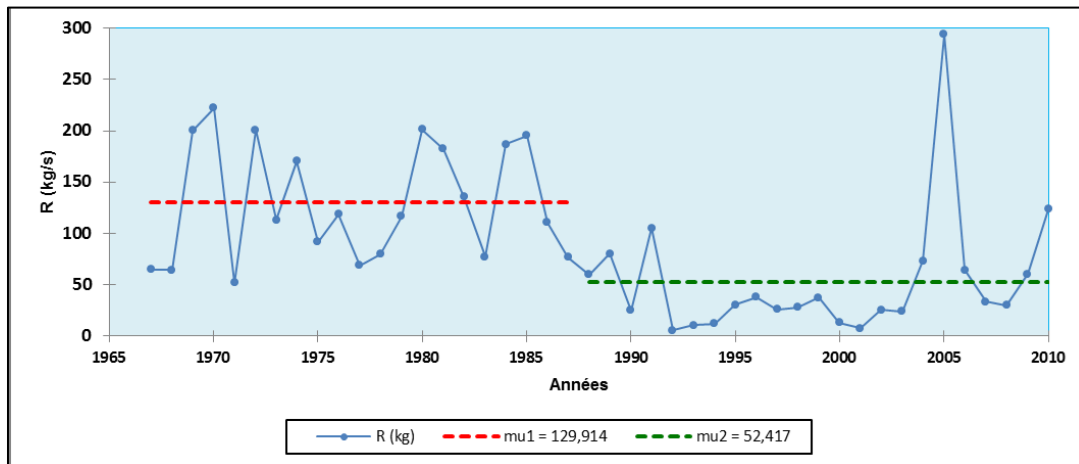
Vus les résultats sur le contrôle des débits, que n'on peut pas toujours expliquer par des causes environnementales ou des interventions anthropiques, on prend aussi en considération la possibilité d'erreurs sur la courbe de tarage, comme par exemple le dé-tarage à une station hydrométrique.

### 5.1.3.2. Les débits solides

Comme mentionné dans le chapitre §5.1.1., les jeux de données des alluvions en suspension disponibles ont été plus courtes, couvrant pour la plupart des stations la période entre 2001 et 2010, à l'exception de quelques stations hydrométriques sur la rivière Jiu avec des séries plus longues. Par conséquent, pour la plupart des stations, une analyse de l'homogénéité et de la stationnarité pendant des périodes aussi courtes ne convient pas. De plus, comme nous l'avons aussi mentionné (§5.1.2.), étant donné que les débits journaliers d'alluvions en suspension sont estimés indirectement (à partir de la corrélation avec les débits liquides), ils sont susceptibles d'être affectés par des erreurs et des incertitudes et, par conséquent, ils doivent être utilisés avec précaution.

La seule station hydrométrique dont les débits des alluvions en suspension ont été disponibles pour une plus longue période est la s.h. de Podari (1966 – 2013). Pour cette station, nous avons eu la possibilité

d'appliquer, comme pour les séries de débits liquides, les deux tests d'homogénéité et stationnarité qu'on a présenté au chapitre §5.1.3.1 (le test de Pettitt et le test de Dickey – Fuller). Rappelons – nous que pour la série de débits liquides de Podari, l'année de rupture a été 1977, marquant une baisse de la moyenne interannuelle d'environ 94 à 78 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Dans le cas des débits d'alluvion en suspension (**Figure V.13**), la rupture s'est produite un peu plus tard, en 1983, ce qui a marqué une baisse d'environ 50% du débit moyen annuel (de plus de 120 kg/s avant 1983 à moins de 60 kg/s de nos jours).



**Figure V.13.** Variabilité des débits moyens annuels d'alluvions en suspension à s.h. Podari (1976 – 2010)

L'année de rupture 1983 coïncide avec celle de la plupart des stations hydrométriques en amont en ce qui concerne l'homogénéité et la stationnarité de leurs séries de débits liquides, qui est probablement une conséquence des aménagements complexes dans les bassins des rivières Motru, Tismana et la Jiu supérieure, des travaux de construction des barrages qui ont réduit l'apport solide de ces rivières.

Etant donnée la longueur insuffisante des séries de débits solides des autres stations pour leur vérification en termes d'homogénéité et stationnarité, nous avons essayé de répondre à la question de la validité des débits solides sous un autre angle, en vérifiant comment les séries quotidiennes de débits d'alluvions en suspension ont été obtenues à partir d'un nombre restreint de mesures réelles. Les méthodes employées consistent à analyser la relation entre les débits mesurés et estimés indirectement.

Dans les jours avec des débits d'alluvions en suspensions mesurés, nous avons extrait les deux valeurs (celle mesurée et celle estimée par la relation débit liquide – débit solide) et nous les avons inscrites dans une fiche individuelle pour chaque station. Ensuite, la corrélation entre les deux séries de valeurs (mesurées et estimées) a été vérifiée par deux méthodes : **a.** le test de Fisher d'égalité des moyennes (F test) ; et **b.** le test « t » pour des paires des valeurs indépendantes (T test).

**Le test F** [Fisher, 1922, 1945, 1954] permet de comparer les variances de deux séries gaussiennes en vérifiant l'hypothèse nulle que deux lois normales ont la même variance ( $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$ ). Si le nombre de valeurs des deux séries est différent, nous sommes dans le cas d'un test de l'homogénéité des variances, ce

qui ne concerne pas nos jeux de données, pour lesquels nous avons attribué à chaque valeur réelle mesurée du débit solide la valeur estimée du même jour. Les deux hypothèses sont :

**H<sub>0</sub>**: Le rapport entre les variances est égal à 1, ce qui signifie que les données observées et mesurées sont similaires ou identiques.

**H<sub>a</sub>**: Le rapport entre les variances est différent de 1, ce qui signifie qu'il existe plusieurs, sinon tous les couples de données observées et estimées, très différents.

Pour chaque mise en œuvre, la valeur *p* est calculée et, afin de valider les valeurs estimées comme correspondant aux valeurs mesurées (réelles), elle doit être inférieure au niveau de signification  $\alpha \leq 0,05$ .

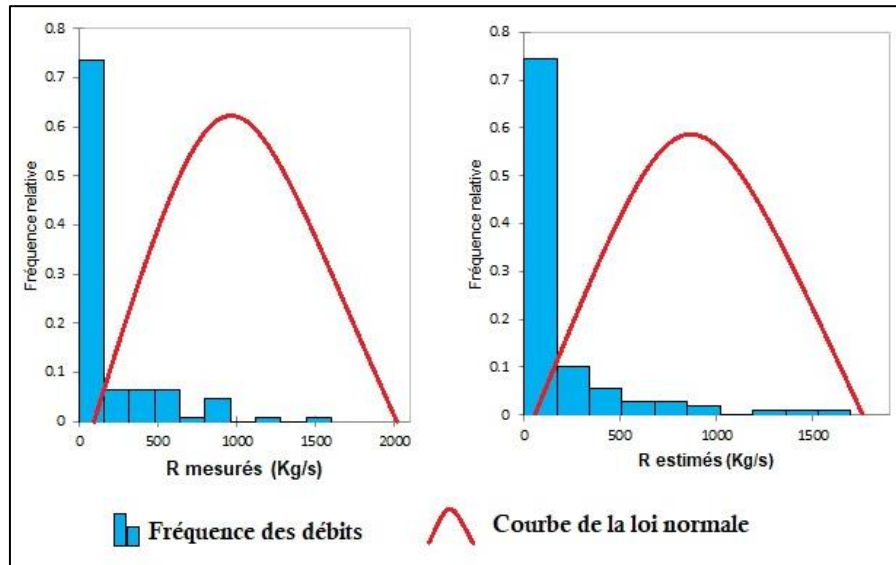
Le test fonctionne de la manière suivante : soit R le rapport supposé entre les variances (R vaut 1 lorsque lorsqu'il y a une égalité). La statistique F du test est donnée par la relation :  $F = s_{\max}^2 / R * s_{\min}^2$ . Pour vérifier les hypothèses, le F théorique est comparé au F observé. Cette statistique suit une loi de Fisher à  $(n_1-1)$  et  $(n_2-1)$  de degrés de liberté si les deux échantillons suivent une loi normale [Fisher, 1922, 1954]. Au préalable, nous nous étions assurés que les séries des débits des alluvions en suspension mesurés et estimés suivent une loi normale, aussi par des approches empiriques (visualisation de l'histogramme des valeurs ; ajustement sur une courbe gaussienne des résidus : la différence entre la distribution observée et la loi normale ; analyse de la symétrie des boîtes à moustaches de la distribution des valeurs), que par des approches probabilistes, en appliquant le test de normalité Anderson – Darling.

**Le test t** (T Test) à deux échantillons [Snedecor et Cochran, 1989] est utilisé pour déterminer si deux moyennes de population sont égales. L'avantage de ce test est qu'il peut être appliqué à des séries de données qui ne suivent pas nécessairement une distribution gaussienne. Les hypothèses sont les suivantes :

- H<sub>0</sub>: La différence entre les moyennes est égale à 0.
- H<sub>a</sub>: La différence entre les moyennes est différente de 0.

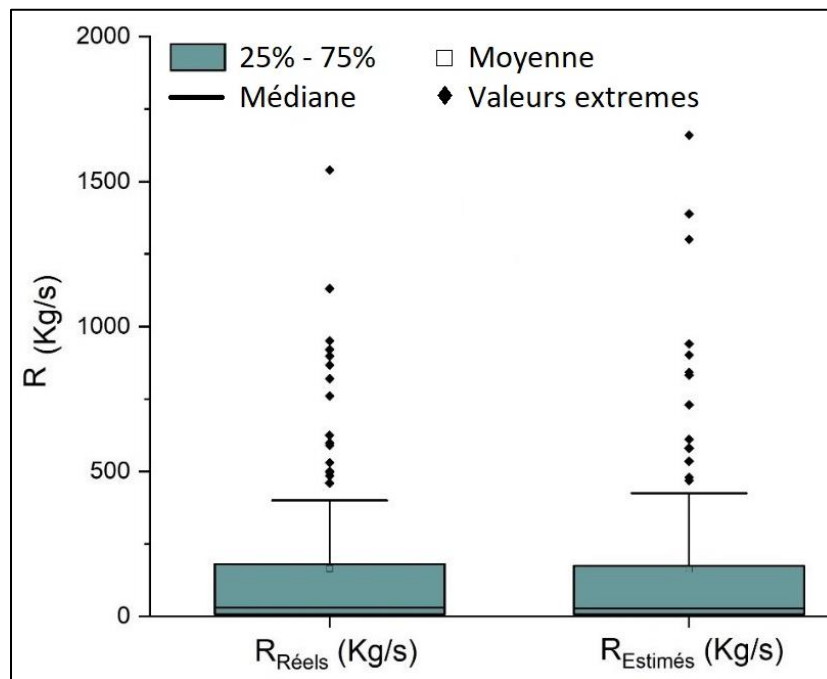
Nous avons appliqué ces deux tests pour les 22 paires de données du débit d'alluvions en suspension mesuré et estimé provenant des 22 stations hydrométriques avec un programme de mesure complète (des débits liquides aussi que des débits solides). Le nombre de paires de données par an a été différent pour les 22 stations hydrométriques et, par conséquent, les séries sont formées de 66 jusqu'à 174 valeurs, ce qui donne en moyenne entre 5,5 et 14,5 mesures du débit solide par an. Premièrement, nous avons testé la distribution normale des débits. Pour toutes les stations, nous avons obtenu des résultats qui rejettent l'hypothèse de normalité, puisque les mesures des débits des alluvions en suspension se font plutôt pendant les périodes de moyens eaux (77% des valeurs s'inscrivent autour de la moyenne de chaque série), alors que seulement 5%, respectivement 18% des valeurs de débits, correspondent au régime des bases et hautes eaux ou en crue. Cela peut poser un problème plus tard sur l'utilisation des débits solides journaliers estimés, en sachant qu'ils ont été obtenus à partir d'un gamme étroite de valeurs mesurées.

Pour illustrer un exemple de station parmi les 22 dont la série de débits solides ne suit pas une distribution gaussienne, nous avons choisi la station principale sur la rivière Jiu, s.h. Podari (*Figure V.14*).



**Figure V.14.** La distribution de la fréquence relative des débits des alluvions en suspension (R) de la rivière Jiu mesurés et estimés à la station hydrométrique de Podari (2001 – 2010)

Une autre façon de vérifier la normalité des séries de débits solides a été d’analyser de manière visuelle les boîtes à moustaches des deux séries (*Figure V.15*). On y voit de nouveau que la plupart des débits se situent dans la partie inférieure de l’intervalle des valeurs, alors qu’une dizaine de valeurs s’étalent bien au-dessus de la borne supérieure (ceux qui ont été mesurés ou estimés pendant les jours de crue).

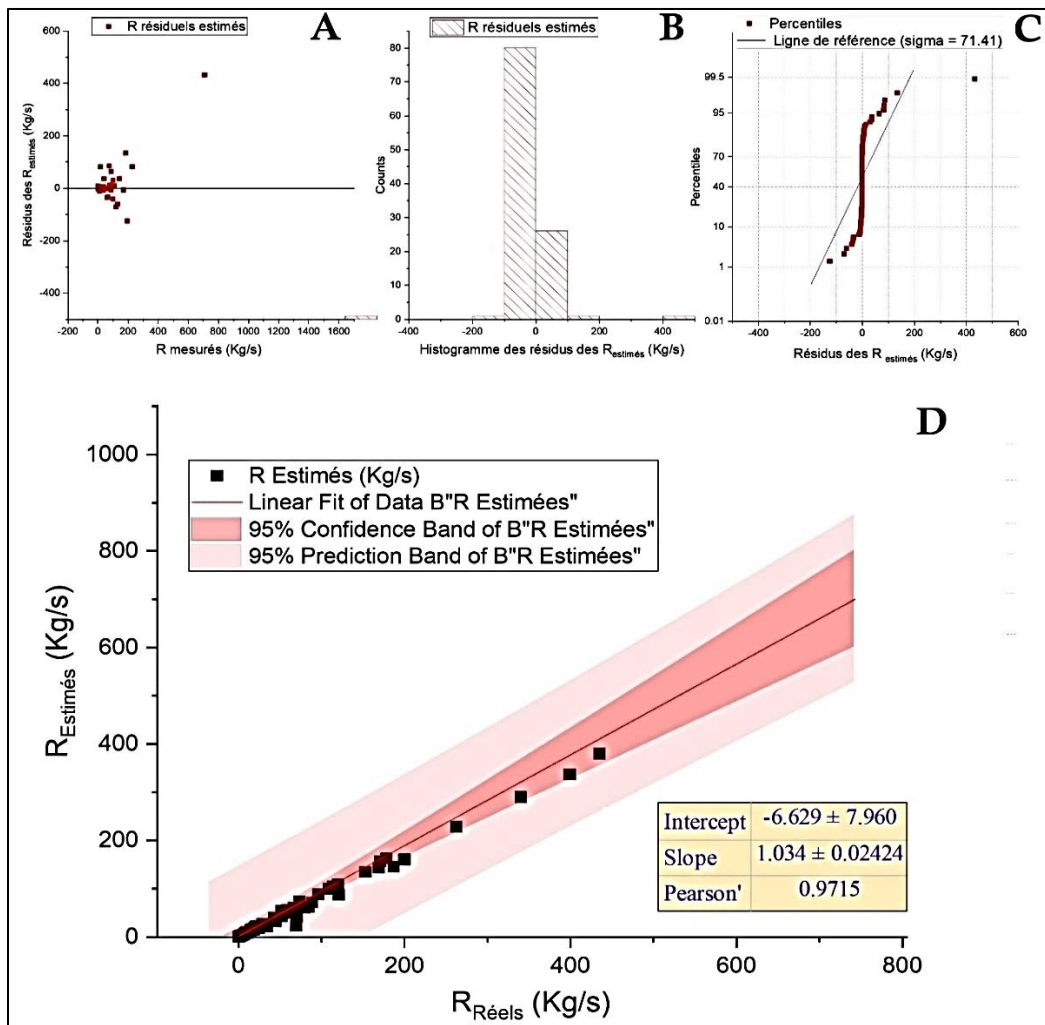


**Figure V.15.** Les boîtes à moustaches des débits d’alluvions en suspension (kg/s) de la rivière Jiu à la station hydrométrique Podari (2001 - 2010)

Afin de vérifier la normalité des séries de données analysées, nous avons utilisé le test Anderson – Darling qui permet de déterminer si un échantillon de données est issu d'une certaine distribution de probabilité [Anderson et Darling, 1952]. Dans sa forme de base, le test suppose qu'il n'y a pas de paramètres à estimer dans la distribution testée, situation où le test et son ensemble de valeurs critiques sont exempts de distribution [Stephens, 1964]. En notant avec  $F(x)$  la fonction de répartition basée sur les données à analyser et avec  $F_0(x)$  la distribution normale, nous avons reproduit ainsi la fonction de répartition théorique, selon les hypothèses nulle et alternative suivantes [Saporta, 2006]:

- $H_0$ :  $F(x)$  est égale à  $F_0(x)$ .
- $H_a$ :  $F(x)$  est différente de  $F_0(x)$ .

Dans la **Figure V.16**, nous avons représenté les graphiques de la corrélation entre les débits solides mesurés et les résidus (A), l'histogramme des résidus (B), le graphique des résidus ajustés sur la loi normale (C), ainsi que la corrélation entre les débits solides mesurés et estimés entourés par l'intervalle de confiance (D) à la station hydrométrique Podari sur la rivière Jiu.

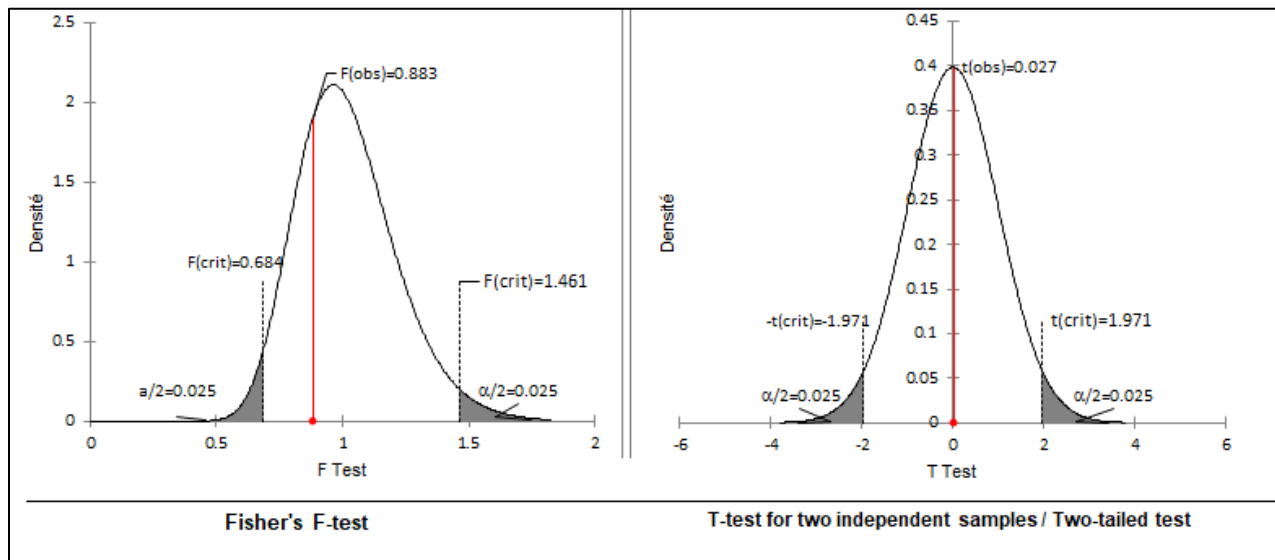


**Figure V.16.** Résultats de l'application du test de normalité Anderson – Darling à la station Podari sur la rivière Jiu



Les débits solides d'alluvions en suspension mesurés et ceux estimés sont en bonne corrélation ( $r = 0.97$ ), ce qui peut nous donner de la confiance dans l'utilisation ultérieure de ces débits. Cependant, encore une fois il nous est démontré que les débits solides utilisés dans cette analyse de validité ne suivent pas la loi normale, ce qui peut être un obstacle à l'application de la méthode Fisher. Cela ne signifie pas nécessairement que toutes les valeurs quotidiennes suivent une distribution non normale, mais que les quelques valeurs que nous utilisons ne sont pas bien distribuées. Nous avons donc décidé d'appliquer à la fois les tests de Fisher et T, pour vérifier si les variances et les moyennes des deux séries de données correspondent.

Nous présentons le même exemple de la station hydrométrique de Podari où nous pouvons voir qu'il existe une bonne correspondance entre les deux séries de données (**Figure V.17**). En effet, pour cette station, il faut noter une très bonne distribution des valeurs de densité, résultant d'une très petite différence entre les valeurs moyennes des deux séries de données (de 1.093 kg/s) et un rapport entre les variances de 0,88 (très proche de celui idéale qui devrait être égal à 1).



**Figure V.17.** Les densités des valeurs et les paramètres statistiques correspondants aux deux tests utilisés (Fisher – à gauche ; T test – à droite)

Dans le **Tableau V.2**, nous présentons les résultats des tests T (T-test de deux échantillons indépendants avec les hypothèses sur les différences entre les moyennes) et F (F – test avec les hypothèses sur le rapport entre les variances) pour toutes les 22 stations. L'acceptation de l'hypothèse nulle des deux tests (qui correspond à la situation attendue, quand les valeurs des MES mesurés et estimés sont similaires) a été faite en fonction de la valeur du paramètre  $p$ , qui doit être supérieur au niveau  $\alpha=0,05$ . A côté des paramètres statistiques d'intérêt pour les valeurs mesurées et estimées utilisées dans l'analyse (les MES moyen, maximal et son écart type), nous avons ajouté aussi le débit d'alluvions en suspension (MES) moyen

et maximal (estimés) pour toute la période d'analyse (2001 – 2010), afin de pouvoir comparer ces valeurs avec celles correspondantes aux petites séries mesurées.

**Tableau V.2.** Les résultats des tests F et T et des corrélations linéaires entre les débits d'alluvions en suspension (MES) mesurés et estimés aux 22 stations hydrométriques analysées (2001 – 2010)

No. station	Station hydrométrique	Rivière	MES <sub>estimé</sub> ~MES <sub>mesuré</sub>					
			Nombre de paires de valeurs	<i>p</i> -value (T - test)	Différence entre les moyennes	<i>p</i> -value (F - test)	Rapport entre les variances	Pearson <i>r</i>
7	Bărbățeni	Jiu de l'Ouest	94	0.796	-0.023	0.391	0.851	0.936
58	Broșteni	Motru	75	0.513	9.707	<0.0001	2.464	0.972
67	Bustuchin	Amaradia	69	0.481	2.673	<0.0001	2.544	0.970
5	Câmpu lui Neag	Jiu de l'Ouest	98	0.424	0.069	<0.0001	2.201	0.912
29	Celei	Orlea	152	0.525	0.010	1	1	0.960
60	Corcova	Coșuștea	174	0.471	3.531	0.052	1.345	0.969
63	Fața Motrului	Motru	66	0.499	10.171	0.228	1.351	0.996
48	Filiași	Jiu	76	0.948	1.309	0.785	1.065	0.968
9	Iscroni	Jiu	134	0.719	0.843	0.436	1.161	0.945
10	Lonea Jiu	Jiu de l'Est	124	0.641	0.036	0.011	1.648	0.967
11	Lonea Taia	Taia	158	0.894	0.070	0.132	1.304	0.998
74	Podari	Jiu	116	0.978	1.093	0.521	0.883	0.972
64	Răcari	Jiu	112	0.861	-3.961	0.571	0.896	0.883
34	Rovinari	Jiu	67	0.004	-0.837	0.539	1.164	0.797
20	Sadu	Jiu	92	0.940	-0.045	0.279	1.256	0.976
62	Strehaia	Hușnița	126	0.373	0.636	0.252	1.240	0.887
31	Telești	Bistrița	134	0.062	-1.775	<0.0001	0.193	0.654
43	Tg. Cărbunești	Gilort	126	0.871	0.733	0.131	1.328	0.981
47	Turburea	Gilort	104	0.958	0.797	0.069	0.697	0.785
38	Turceni	Jilț	114	0.797	0.229	0.870	1.032	0.899
6	Valea de Pești	Valea de Pești	104	0.719	0.027	0.006	1.725	0.987
75	Zăval	Jiu	96	0.976	1.641	0.987	1.003	0.990

Pour les 22 stations, il y a une très bonne corrélation entre les valeurs mesurées et estimées (le coefficient de corrélation *r* est toujours supérieur à 0,75), ce qui peut être une garantie que les débits solides estimés dans le cadre du programme de mesures des débits solides en Roumanie sont utilisables pour des analyses générales (de variabilité annuelle aux stations hydrométriques ou variation spatiale des valeurs moyennes mensuelles et annuelles). L'exception est introduite par un nombre restreint de stations, dont les valeurs *p* sont marquées en rouge. Les stations dont les valeurs de MES mesurés et estimés utilisées dans l'analyse ne sont pas similaires, comme démontré soit par le test T, soit par le test F, sont en général

localisées sur des petites rivières, dans des secteurs où il y a une connectivité ou déconnexion naturelle ou d'origine anthropique entre les zones de source des alluvions et les vallées. Ainsi, nous pouvons expliquer le manque de concordance entre une partie des valeurs des MES estimés et mesurés aux stations hydrométriques de Câmpu lui Neag, Valea de Pești et Bustuchin, par le fait qu'elles sont situées très près des sources des rivières Jiu de l'Ouest, Valea de Pești et Amaradia, où il y a possiblement des apports supplémentaires de sédiments (cette situation est confirmée par les valeurs moyennes et maximales des MES mesurés supérieures aux valeurs de MES estimées – *Tableau V.3*).

**Tableau V.3.** Comparaison entre les valeurs des paramètres de statistique de base des MES mesurés et estimés aux 22 stations hydrométriques analysées (2001 – 2010)

No. station	Station hydrométrique	Nombre de paires de valeurs	MES mesurés			MES estimés		
			Rmoy	Ecart type	Rmax	Rmoy	Ecart type	Rmax
7	Bărbățeni	94	0.45	0.64	3.48	0.48	0.69	3.3
58	Broșteni	75	37.82	108.20	678	28.12	68.93	447
67	Bustuchin	69	7.06	26.61	167	4.39	16.69	111
5	Câmpu lui Neag	98	0.30	0.69	4.03	0.23	0.47	3.02
29	Celei	152	0.09	0.15	1.24	0.09	0.15	0.811
60	Corcova	174	24.83	48.89	286	21.30	42.15	268
63	Fața Motrului	66	69.44	92.36	435	59.27	79.46	380
48	Filiași	76	40.69	125.69	650	39.38	121.78	630
9	Iscroni	134	9.43	18.06	107	8.59	16.77	130
10	Lonea Jiu	124	0.38	0.63	4.52	0.34	0.49	3.32
11	Lonea Taia	158	0.83	4.50	50.3	0.76	3.94	43.8
74	Podari	116	165.15	286.17	1540	165.11	304.46	1660
64	Răcari	112	99.55	160.91	810	103.51	169.99	901
34	Rovinari	67	1.04	1.71	9.63	1.88	1.58	6.8
20	Sadu	92	3.66	4.26	23.6	3.71	3.80	20
62	Strehaia	126	3.52	5.69	23	2.89	5.11	34.2
31	Telești	134	1.98	4.15	31.2	3.76	9.44	73
43	Tg. Cărbunești	126	11.04	36.43	370	10.30	31.61	303
47	Turburea	104	38.59	98.80	708	37.79	118.31	1100
38	Turceni	114	3.14	6.59	42	2.91	6.49	42
6	Valea de Pești	104	0.16	0.61	6.08	0.13	0.46	4.6
75	Zăval	96	221.33	380.54	2520	219.69	379.93	2470

La station hydrométrique de Broșteni ne se situe pas dans le secteur supérieur de la rivière Motru, mais en aval de l'extrémité occidentale du bassin minier Motru – Rovinari, d'où des sources supplémentaires de sédiments enrichis de charbon peuvent provenir. A la station de Rovinari, située sur la rivière Jiu en aval des réservoirs Vădeni et Târgu Jiu, qui jouent le rôle des obstacles/ trappes anthropiques

dans le chemin des sédiments, l'apport sédimentaire est sous-estimé, alors que des sources locales et des affluents non-jaugés de la Jiu dans ce secteur (provenant du bassin des rivières Tismana et Amaradia Pietroasă) peuvent s'ajouter au volume total de sédiments transitant à cette station hydrométrique. La seule situation contraire caractérise la station Telești sur la rivière Bistrița, où une quantité plus grande de sédiments est attendue et estimée, alors qu'en terme de quantités réelles mesurées, cette rivière semble produire moins – **Tableau V.3** (une influence des deux réservoirs – barrages, Clocoțiș et Vâja, sur le transfert des sédiments est tout à fait possible). Le coefficient de corrélation ( $r$ ) entre les débits solides mesurés et estimés est toujours au-dessus de 0.75.

### **5.1.3.3. Précisions sur l'utilisation des séries de débits liquides et solides dans des analyses hydrologiques**

Dans ce chapitre, nous allons analyser la variabilité des débits liquides et solides, qui demande de précisions sur le choix des périodes et des stations hydrométriques. Étant donné le nombre considérable de stations hydrométriques dans le bassin de la rivière Jiu, ainsi que la difficulté de couvrir tous les aspects liés à la variabilité hydrologique, nous avons décidé d'utiliser qu'une partie des stations hydrométriques.

Un *premier critère* est la période commune des séries de données disponibles. En ce qui concerne les débits solides, le choix est simplifié par la période unique de nos jeux de données (2001 – 2010).

Le *deuxième critère* porte sur la représentativité des stations hydrométriques pour les sous-bassins versant les plus importants. Les stations situées le plus en aval (i.e. la s.h. de Podari sur la Jiu) ont été privilégiées pour les rivières bénéficiant de plusieurs stations hydrométriques dans la plupart des situations. Ce choix des stations est, quand même, valable pour les analyses statistiques détaillées et pour leurs représentations graphiques. La construction des cartes hydrologiques générales de certains paramètres (i.e. le débit spécifique,  $q[l \cdot s^{-2} \cdot km^2]$ ), requiert plusieurs stations, par conséquent nous avons utilisé les données de toutes les stations ayant fonctionné sans interruptions dans la période commune d'analyse choisie.

Le *dernier critère* est l'homogénéité des séries de débits. Cela suppose de vérifier si les paramètres statistiques principaux de l'écoulement dans la période d'analyse choisie se sont maintenus jusqu'à présent. Ainsi, l'analyse de stationnarité (§5.1.3.1) a montré que la majorité des séries de débits présentent une rupture autour des années 1980 – 1985. Même si les débits moyens multi-annuels des deux périodes, avant et après la rupture, ne diffèrent pas autant, cela nous force d'être prudents dans les analyses comparatives entre les stations. À cet argument, on doit ajouter la longueur différente des séries des débits liquides journaliers à chaque station hydrométrique, les unes n'ayant pas fonctionné avant les années '80.

Afin de nous assurer que les paramètres hydrologiques correspondent à la même période d'étude, on a décidé de restreindre notre analyse hydrologique des débits liquides à la période 1984 – 2013 dans la plupart des cas et d'étudier les stations les plus importantes du bassin, qui se trouvent en général près des confluences. La plupart de ces stations disposent aussi de mesure du débit solide.

## 5.2. Variabilité spatio-temporelle des débits liquides

### 5.2.1. Echelle multi-annuelle et annuelle

L'étude de la variabilité des débits liquides à l'échelle multi-annuelle (appelée aussi *interannuelle*) est une démarche essentielle dans l'analyse du potentiel hydrologique de la zone d'étude, du plusieurs points de vue. *Premièrement*, l'eau est le vecteur qui assure le transfert des flux liquides et solides dans le système fluvial. *Deuxièmement*, à des échelles de temps annuelles à pluriannuelles le flux liquide est l'un des facteurs majeurs contrôlant la morpho-dynamique des lits des rivières. *Troisièmement*, c'est à l'échelle de plusieurs dizaines d'années qu'on peut observer l'influence des changements environnementaux (climatiques et de la couverture du sol, aménagements hydrotechniques etc) sur les ressources en eau et le transport des sédiments. En travaillant à l'échelle multi-annuelle il est possible d'aboutir à un savoir acquis sur le contexte général de la variabilité spatio-temporelle des ressources en eau, d'identifier les tendances des débits liquides, de connaître les événements extrêmes du passé et leur temps de retour pour la mise en place d'une gestion adéquate des ressources en eau et des risques associés.

Aucune définition n'existe pas sur l'étendue de la période qu'on appelle « pluriannuelle » ou « multiannuelle », car si on prend ce terme à la lettre, nous pourrions considérer que quelques années suffisent pour connaître le comportement hydrologique d'une rivière. Cependant, il faut noter que nous ne pouvons pas obtenir de résultats concluants si nous nous limitons à quelques années. C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons essayé d'utiliser des bases de données aussi longues que possible des stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu. Nous reviendrons sur cet embarras (de la courte période de données disponibles au niveau pluriannuel), lorsque nous présenterons cette variabilité en ce qui concerne les débits des alluvions en suspension.

#### 5.2.1.1. La variabilité des débits moyens multiannuels

La variabilité spatiale des débits liquides à l'échelle pluriannuelle peut être mise en évidence par le débit moyen multiannuel ( $Q_0$ ,  $m^3s^{-1}$ ) et d'autres paramètres qui expriment les ressources en eau des rivières (le débit spécifique -  $q$ , ou le volume de l'eau -  $W$ ) [Pişota et Zaharia, 2002].

$$\text{La formule du débit spécifique est: } q = \frac{Q_0 \cdot 1000}{F} [l \cdot s^{-1} \cdot km^2]$$

$$\text{La formule du volume de l'écoulement liquide est : } W = Q \cdot 31,54 \cdot 10^6 [m^3 \text{ ou mil. } m^3]$$

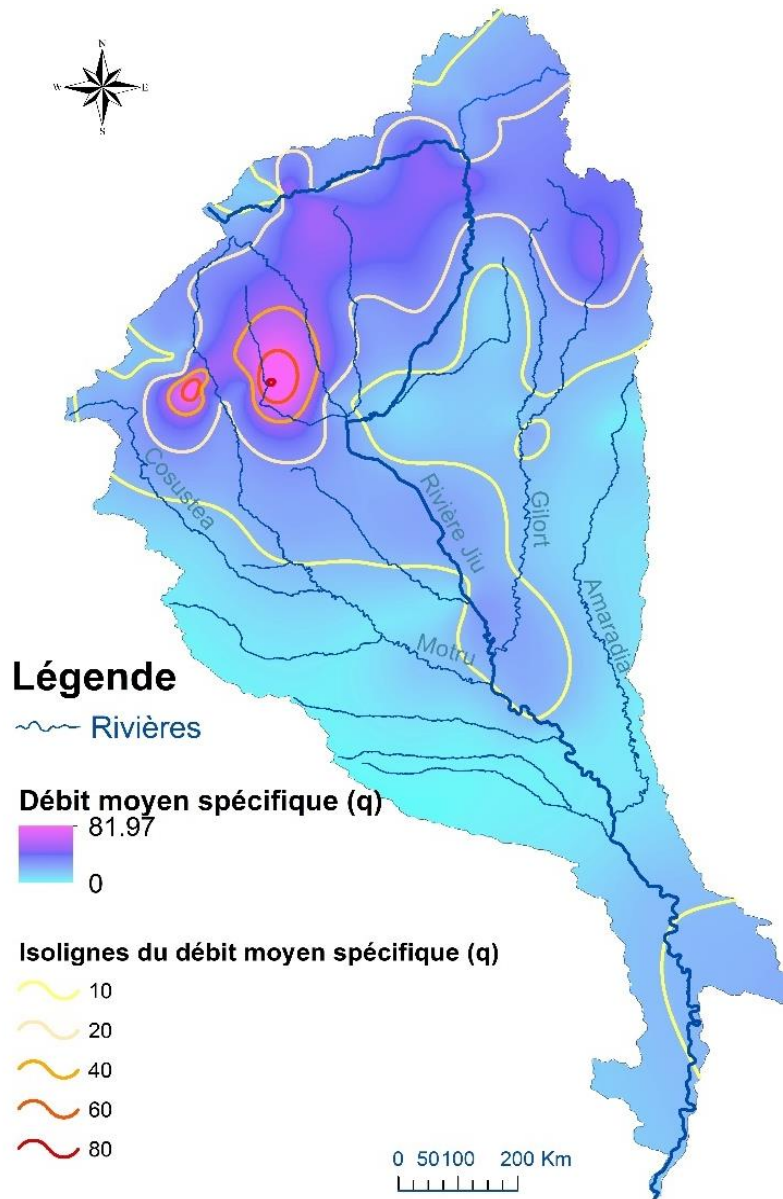
Où  $q$  = le débit spécifique,  $Q_0$  = le débit moyen multiannuel,  $F$  = la superficie du bassin versant,  $W$  = le volume de l'eau.

Afin de mettre en évidence la variabilité spatiale des ressources en eau, nous avons choisi le débit moyen spécifique pluriannuel ( $q_{moy}$ ,  $l \cdot s^{-1} \cdot km^2$ ), un paramètre simple et synthétique permettant de réaliser



une régionalisation des ressources en eau disponibles sur les rivières d'un bassin versant, en éliminant les effets de la superficie.

Pour le calcul du débit moyen spécifique,  $q_{\text{moy}}$ , nous avons utilisé les débits liquides annuels de la période commune d'analyse retenue dans le chapitre §5.1.3.3 (1984 – 2013), des 42 de stations hydrométriques avec des mesures complètes pendant ces 30 ans. A partir de ces débits annuels, nous avons calculé le débit liquide pluriannuel,  $Q_0$ , qui a été ensuite converti en débit moyen spécifique,  $q_0$ . La carte de la variation spatiale du débit liquide spécifique dans le bassin de la rivière Jiu, par l'opération d'interpolation en environnement SIG de valeurs des débits spécifiques aux 42 stations hydrométriques considérées dans l'analyse (**Figure V.18**).



**Figure V.18.** Le débit moyen spécifique multiannuel ( $q_0$ ,  $l \cdot s^{-1} \cdot km^2$ ) dans le bassin de la rivière Jiu (1984 – 2013)

Le gradient du débit moyen spécifique multiannuel est illustré en nuances de bleu, tandis que les isolignes les plus importantes (10, 20, 40, 60 et 80 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>) sont marquées en nuances de jaune à rouge. Les valeurs les plus élevées du débit moyen spécifique multiannuel (supérieures à 30 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>) sont constatées dans les bassins supérieurs des rivières Tismana et Motru, situés dans la partie centrale occidentale du bassin de la rivière Jiu. Ces deux sous-bassins sont très particuliers à cause de deux facteurs. D'un côté, la dominance du calcaire qui, par les fissures et cavités favorisent le drainage souterrain de l'eau susceptible d'augmenter le volume d'eau écoulé en aval de ces zones, par rapport à l'écoulement réel spécifique pour les bassins hydrographiques de taille similaire. De l'autre côté, l'influence anthropique du système hydrotechnique complexe de Cerna – Motru – Tismana se fait sentir en aval du relief karstique par une forte augmentation des débits liquides aux stations hydrométriques situées sur la Tismana. Nous avons vu au chapitre §5.1.3.1 que le débit moyen annuel de la Tismana aux stations de Călnic et Godinești a été triplé par les apports des volumes d'eau des bassins versants voisins (b.v. de la Motru, b.v. de la Cerna) et des rivières affluentes du même bassin (la rivière Bistrița et la petite rivière Valea Mare).

Des débits liquides spécifiques plus élevés (entre 20 et 40 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>) caractérisent aussi toute la zone montagneuse, englobant les bassins supérieurs de la rivière Jiu et de ses affluents principaux, les rivières Motru et Gilort (avec alimentation souterraine karstique dans le sous-bassin Pârâul Galben).

La zone collinaire du bassin de la rivière Jiu présente des débits moyens spécifiques assez bas (au-dessous de 20 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>), même inférieurs à 10 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup> vers les extrémités occidentale et orientale (les sous-bassins d'Argetoiaia, Raznic et Amaradia).

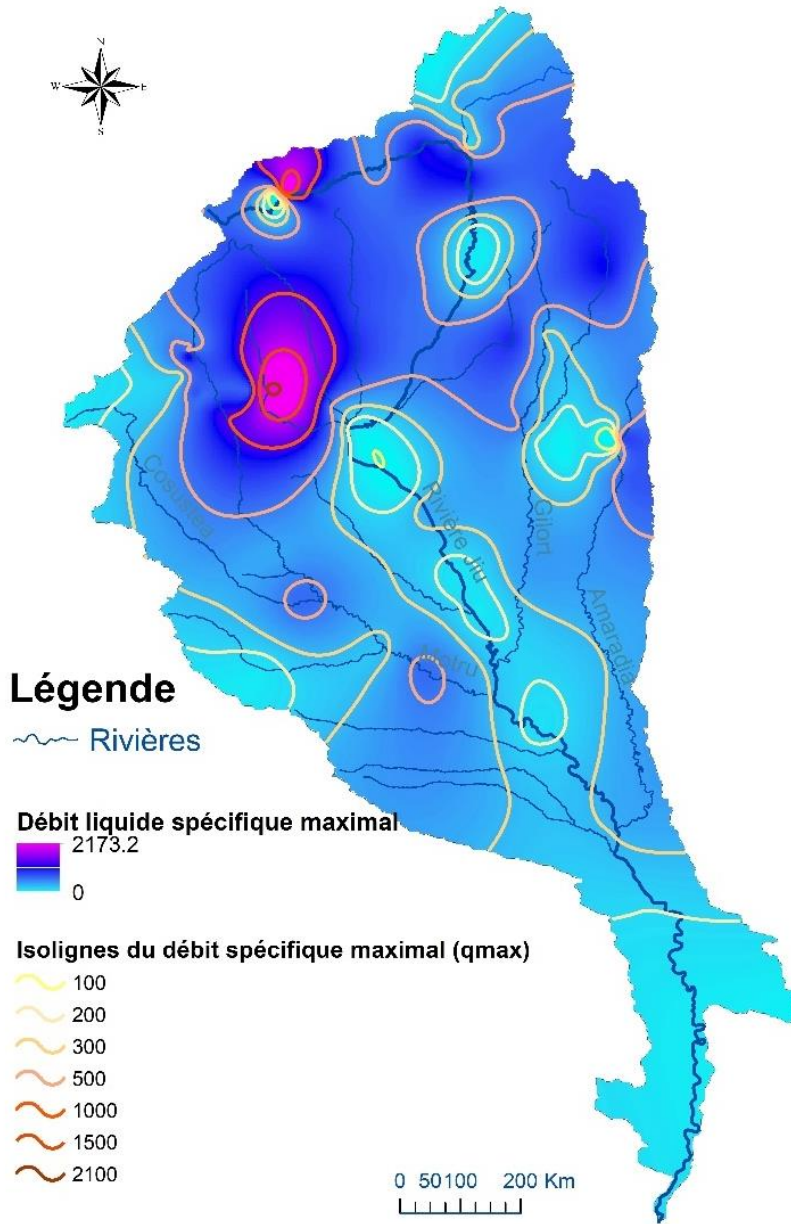
Dans le secteur de plaine, en aval de la station hydrométrique de Podari, le débit moyen spécifique commence à augmenter de nouveau vers l'embouchure de moins de 10 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup> à environ 15 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>. Dans ce dernier secteur, même si la Jiu ne reçoit plus d'affluents importants, l'écoulement plus important que celui dans le piémont bas reflète une alimentation souterraine importante à la périphérie du piémont, au contact avec la plaine.

Enfin, annuellement, le bassin de la rivière Jiu contribue à l'écoulement du Danube avec un volume de 2736,3 millions de m<sup>3</sup> par an, correspondant à un débit moyen annuel de 86,8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> à la station hydrométrique de Zăval, environ 8 km amont de l'embouchure.

### **5.2.1.2. La variabilité des débits maximaux multiannuels**

Afin de caractériser la variabilité spatiale de l'écoulement maximal à l'échelle pluriannuelle, nous avons considéré aussi le débit spécifique, à la différence que cette fois il a été calculé à partir des débits maximaux multi-annuels aux stations hydrométriques analysées antérieurement ( $q_{\max}$ , l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>). La carte qui en résulte est présentée dans la **Figure V.19**. On remarque l'existence de deux noyaux de débit maximal élevé (>1000 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>) dans le bassin supérieur occidental de la rivière Tismana, autour de la station

hydrométrique de Godinești ( $q_{\max} = 2083 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$ ) et dans le bassin supérieur de la Jiu de l'Ouest, autour de la station hydrométrique Lazăr de l'affluent homonyme, dont le débit spécifique maximal est le plus grand de tout le bassin de la rivière Jiu ( $q_{\max} = 1\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$ ), possiblement dû aux transferts en souterrain de l'eau de la rivière voisine, la Buta. Le débit spécifique maximal de cette dernière rivière, qui s'écoule dans une vallée karstique, est le plus bas de tout le bassin versant de la rivière Jiu. Cet argument soutient l'importance de la communication par le système karstique entre les rivières Buta et Lazăr pendant le régime des hautes eaux et crues, comme on vient de voir avec l'exemple du débit spécifique maximal.



**Figure V.19.** Le débit maximal spécifique multiannuel ( $q_{\max}$ ,  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$ ) dans le bassin de la rivière Jiu (1984 – 2013)

La situation ne concerne pas toute l'année, car en régime moyen, sur la carte précédente (*Figure V.18*), la rivière Buta ne sort pas en évidence avec le plus bas débit moyen spécifique (sa valeur de  $7,45 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$ , même parmi le plus basses, est caractéristique de l'intervalle des valeurs pour les stations hydrométriques en amont des résurgences karstiques et supérieure à celles des stations hydrométriques situées dans le bas piémont, dans les bassins versants de l'Amaradia, la Huşniţa ou la Raznic).

En dehors de ces deux zones de débit spécifique maximal supérieur à  $1000 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$ , les valeurs suivent en général le gradient altitudinal, avec parfois des noyaux de débit spécifique maximal plus bas, par exemple dans le secteur supérieur de la rivière Amaradia, ou sur la rivière Jiu, en aval de la station hydrométrique de Rovinari, jusqu'à Filiaşi. Le long de la rivière Jiu elle-même, le débit spécifique maximal baisse de  $789 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$  (à Câmpu lui Neag), à  $163 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$  (à Zăval).

### 5.2.1.3. La tendance des débits moyens multiannuels

Afin de caractériser la variabilité temporelle des débits moyens multiannuels ( $Q$ ,  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), nous avons employé le test non paramétrique de Mann Kendall (MK) pour les séries de débits des 54 stations hydrométriques<sup>29</sup>.

Le test non paramétrique de Mann-Kendall [Mann, 1945; Kendall, 1975; Hirsch *et al.*, 1984] fonctionne de manière similaire au test de Pettitt, à la différence qu'il est utilisé pour analyser les modifications des séries temporelles avec le but d'identifier la tendance linéaire à long terme. Ce test est souvent utilisé pour détecter des changements dans les conditions hydrologiques et climatiques [Verstraeten *et al.*, 2006; Zhang et Lu, 2009; Busuioc *et al.*, 2010 ; Obreja, 2012]. Selon Slack et Smith (1982), le test MK est considéré non-paramétrique car il ne nécessite pas que les résidus de la droite de régression ajustée soient normalement distribués, comme requis par autres tests.

Comme le test Pettitt, les deux hypothèses sont les mêmes :  $H_0$ : Pas de tendance monotone ;  $H_a$ : la tendance monotone est présente. En l'absence de tendance, les mesures de débits liquides annuels sont considérées indépendantes et distribuées de manière identique. On se souvient du §5.1.3.1 que l'hypothèse d'indépendance signifie que les données ne sont pas corrélées dans le temps. L'implication directe dans le choix de l'échelle de temps (annuel, mensuel) de l'hypothèse d'indépendance est que l'intervalle de temps entre les échantillons soit suffisamment grand pour qu'il n'y ait pas de corrélation entre les mesures collectées à différents moments. C'est la raison pour laquelle il n'est pas recommandé d'analyser des tendances à des échelles temporelles fines (inférieures au mois).

---

<sup>29</sup> En considérant que l'analyse de la tendance peut être complémentaire aux tests d'homogénéité et de stationnarité qu'on a utilisé dans le sous-chapitre §5.1 en vue de la validité des données, nous avons appliqué le test de Mann – Kendall non seulement sur les stations avec des débits liquides entre 1984 et 2013, mais sur toutes les stations hydrométriques ayant fonctionné sans interruption jusqu'à 2013, de longueur de la série supérieure à 10 ans.

Les niveaux de signification pour la probabilité de rejet de l'hypothèse nulle sont les mêmes que pour le test de Pettitt et le calcul de la probabilité de rejet de l'hypothèse nulle a été effectué en R. Si le test MK montre une tendance dans la série de données (ascendante, décroissante), celle-ci est indiquée par deux variables *S* ou *Z*; si leurs valeurs sont positives, la tendance est positive et si elles sont négatives, la tendance est négative [Hirsch *et al.*, 1984]. Ces deux variables sont calculées différemment en fonction du nombre de valeurs (*n*) dans une série temporelle ( $n < 10$ ) ou *Z* ( $n > 10$ ). Pour le présent travail, les séries temporelles utilisées ont plus de 10 valeurs.

Le test de Mann Kendall permet aussi d'identifier la pente de tendance selon la méthode de Sen [Sen, 1968]. Sans se référer aux formules de calcul englobées dans l'algorithme, le calcul de la pente de Sen fonctionne selon la règle suivante : la première fois une pente intermédiaire est calculée pour toutes les paires de valeurs consécutives de la série de données, ensuite une valeur moyenne est calculée, avec des pentes intermédiaires correspondantes ; la pente finale de Sen est la moyenne des pentes entre toutes les données consécutives [Sen, 1968 ; Gilbert, 1987].

Le but de l'emploi du test de Mann – Kendall dans les séries de données de débits liquides annuels dans le bassin de la rivière Jiu a été d'évaluer statistiquement s'il existe une tendance monotone à la hausse ou à la baisse et de faire une analyse exploratoire pour identifier les stations où les changements sont significatifs, afin d'essayer d'évaluer les possibles facteurs responsables pour ces changements.

Nous avons synthétisé les résultats aussi sous la forme de tableau que sous une forme cartographique. Ainsi, dans le **Tableau V.4**, nous avons fourni les paramètres statistiques issus de l'application du test MK et de la pente de Sen, ainsi que les intervalles de confiance. Notez que la période d'analyse est différente, en fonction de la longueur de la série de chaque station et, par conséquent, les méthodes sont valables que pour la station et périodes considérées.

**Tableau V.4.** La synthèse des résultats du test de Mann – Kendall et de la pente de Sen pour les stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (les débits moyens annuels)

*Les valeurs de significativité  $p$  sont symbolisées de la manière suivante : \*\*\* - tendance pour le niveau de significativité  $\alpha = 0.001$ ; \*\* - tendance pour le niveau de significativité  $\alpha = 0.01$ ; \* - tendance pour le niveau de significativité  $\alpha = 0.05$ ; + tendance pour le niveau de significativité  $\alpha = 0.1$ . Le manque de symbole indique le fait que la série de débit n'enregistre pas une tendance significative du point de vue statistique [Sen, 1968]*

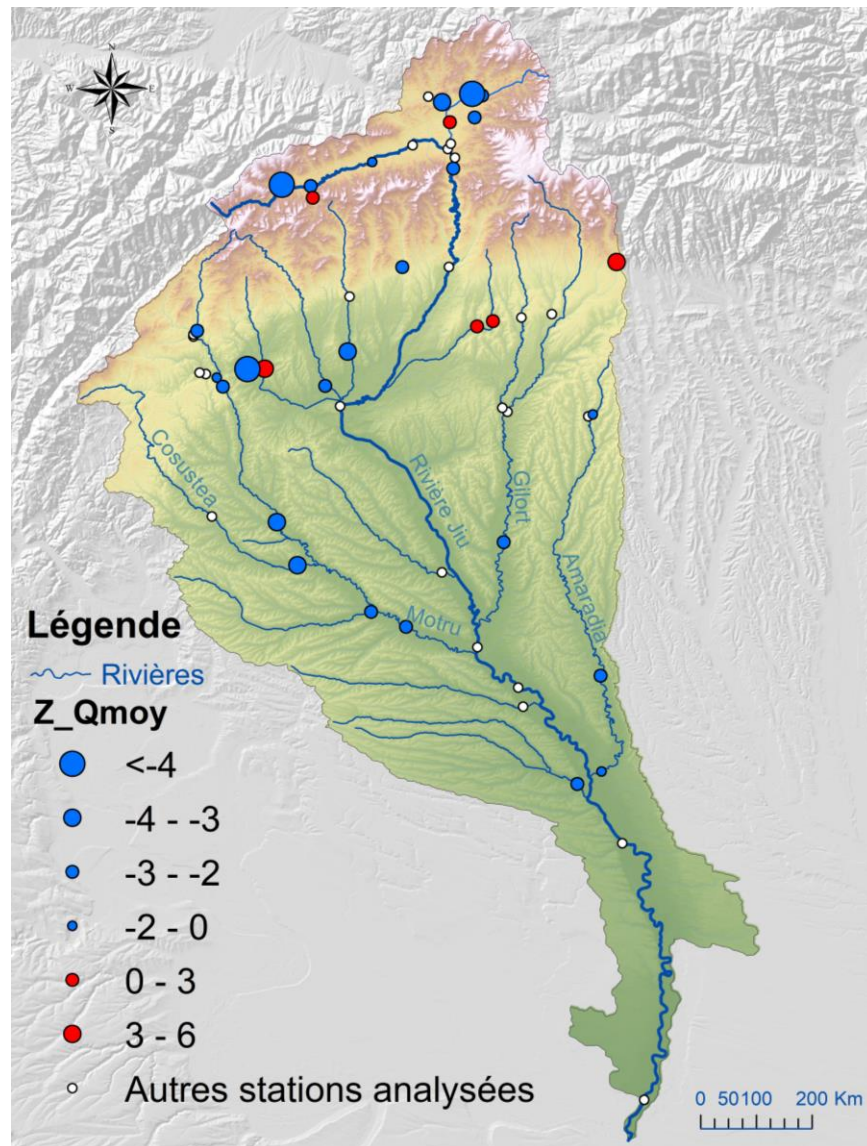
No.	Station hydrométrique	Rivière	Période	Résultats du test Mann-Kendall			Pente du Sen	95% Conf. interval	
				Niveau de significativité	Z	p		Min	Max
1	Albești	Amaradia	1953 - 2013	+	-1.620	0.100	-0.013	-0.031	0.003
2	Baia de Aramă	Bulba	1993 - 2013		0.876	0.381	0.024	-0.026	0.067
3	Baia de Fier	Pârâul Galben	1982 - 2013	**	3.097	0.002	0.025	0.009	0.042
4	Balanesti	Gruiu	1988 - 2013	*	2.292	0.022	0.003	0.001	0.006
5	Bărbățeni	Jiu de l'Ouest	1954 - 2013	+	-1.783	0.075	-0.029	-0.060	0.003
6	Breasta	Raznic	1955 - 2013	*	-2.871	0.004	-0.014	-0.022	-0.006



7	Brebina	Brebina	1988 - 2013		1.367	0.172	0.019	-0.008	0.044
8	Broșteni	Motru	1955 - 2013	**	-3.087	0.002	-0.079	-0.126	-0.030
9	Bustuchin	Amaradia	1994 - 2013	+	-1.655	0.098	-0.004	-0.009	0.001
10	Câmpu lui Neag	Jiu de l'Ouest	1957 - 2013	*	-2.770	0.005	-0.024	-0.038	-0.007
11	Celei	Orlea	1953 - 2013	***	-4.682	0.000	-0.030	-0.041	-0.019
12	Ciocadia	Ciocadia	1982 - 2013		0.114	0.910	0.001	-0.019	0.022
13	Closani	Motru	1966 - 2013	*	-2.820	0.005	-0.036	-0.063	-0.014
14	Corcova	Coșuștea	1955 - 2013	**	-3.152	0.002	-0.037	-0.058	-0.017
15	Dărănești	Bănița	1974 - 2013	**	-3.392	0.001	-0.020	-0.029	-0.008
16	Fața Motrului	Motru	1951 - 2013	**	-2.989	0.003	-0.121	-0.188	-0.049
17	Filiași	Jiu	1951 - 2013		-1.130	0.259	-0.160	-0.416	0.086
18	Godinești	Tismana	1954 - 2013	***	5.925	0.000	0.182	0.140	0.224
19	Iscroni	Jiu de l'Ouest	1955 - 2013		-1.073	0.283	-0.028	-0.069	0.022
20	Jieț	Jieț	1960 - 2013	**	-2.668	0.008	-0.016	-0.027	-0.004
21	Lazăr	Lazăr	1975 - 2013	***	-4.500	0.000	-0.021	-0.026	-0.014
22	Livezeni	Jiu de l'Est	1958 - 2013		-1.364	0.173	-0.020	-0.052	0.012
23	Lonea	Jiu de l'Est	1972 - 2013	**	-2.743	0.006	-0.023	-0.038	-0.007
24	Lonea Taia	Taia	1965 - 2013	***	-4.086	0.000	-0.019	-0.029	-0.011
25	Motru Sec	Motru Sec	1988 - 2013		0.882	0.378	0.009	-0.010	0.027
26	Motrușor	Motrușor	1988 - 2013		1.587	0.113	0.004	-0.001	0.012
27	Negoiești	Amaradia	1974 - 2013	**	-2.738	0.006	-0.035	-0.049	-0.009
28	Ohaba	Amaradia Pietroasă	1988 - 2013	*	2.336	0.019	0.006	0.001	0.012
29	Pestera Bolii	Jupâneasa	1983-2013		0.374	0.709	0.002	-0.010	0.013
30	Petroșani	Maleia	1987-2013	*	2.043	0.041	0.003	0.000	0.006
31	Podari	Jiu	1950 - 2013		-1.304	0.192	-0.231	-0.569	0.125
32	Pojaru	Poienita	1994 - 2013		-0.876	0.381	-0.001	-0.004	0.001
33	Polatiștea	Polatiștea	1964 - 2013	**	-2.715	0.007	-0.012	-0.020	-0.003
34	Răcari	Jiu	1976 - 2013		0.000	1.000	0.016	-0.754	0.800
35	Rovinari	Jiu	1982 - 2013		0.690	0.490	0.050	-0.089	0.228
36	Runcu	Jaleș	1951 - 2013		-0.223	0.823	-0.002	-0.018	0.014
37	Sacelu	Blahnită	1982 - 2013		0.885	0.376	0.004	-0.006	0.013
38	Sadu	Jiu	1982 - 2013		1.605	0.108	0.215	-0.039	0.450
39	Scăiești	Argetoaia	2003 - 2013		-0.311	0.756	-0.001	-0.007	0.005
40	Sisesti	Coșuștea	1990 - 2013		1.215	0.224	0.035	-0.015	0.089
41	Stolojani	Jaleș	1953 - 2013	***	-3.201	0.001	-0.036	-0.054	-0.015
42	Strâmbuta	Izvor	1966 - 2013		0.534	0.594	0.002	-0.005	0.009
43	Strehaia	Hușnița	1970 - 2013	**	-2.721	0.007	-0.016	-0.027	-0.004
44	Târmigani	Motru	1959 - 2013	**	-2.657	0.008	-0.058	-0.099	-0.014
45	Tarnita	Brebina	1970 - 2013	*	-1.770	0.077	-0.060	-0.137	0.007
46	Telești	Bistrița	1957 - 2013	*	-2.516	0.012	-0.034	-0.062	-0.008

47	Târgu Cărbunești	Gilort	1952 - 2013		-1.495	0.135	-0.047	-0.108	0.008
48	Târgu Cărbunești	Blahnița	1967 - 2013		0.752	0.452	-0.001	-0.002	0.004
49	Turburea	Gilort	1952 - 2013	*	-2.466	0.014	-0.062	-0.113	-0.012
50	Turceni	Jilț	1964 - 2013		-1.405	0.140	-0.008	-0.017	0.003
51	Vaidei	Șușița	1960 - 2013	**	-2.910	0.004	-0.015	-0.024	-0.004
52	Valea de Pești	Valea de Pești	1987 - 2013	*	2.459	0.014	0.026	0.006	0.048
53	Vulcan	Merișoara	1965 - 2013		0.768	0.442	0.001	-0.002	0.003
54	Zăval	Jiu	1963 - 2013		-0.032	0.974	-0.006	-0.562	0.504

Les valeurs de Z significatives ont été marquées en rouge et spatialisées dans la **Figure V.20**.



**Figure V.20.** Carte du paramètre Z du test Mann – Kendall appliqué sur les débits liquides moyens annuels aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (bleu – tendance négative, rouge – tendance positive, blanc – sans tendances, le symbole a une taille quelconque)

Dans cette carte, les tendances positives ont été marquées en rouge, tandis que les tendances négatives en bleu. Nous observons que les stations dont le résultat de l'application du test MK a été validé comme significatif du point de vue statistique ont enregistré la plupart des tendances à la baisse, avec des valeurs plus grandes pour les stations de montagne et de plus en plus petites vers l'aval. Il y a moins de situations de tendance à la hausse, celle-ci étant caractéristique de 6 stations sur de petites rivières (Amaradia Pietroasă, des affluents de la Tismana ou de la Gilort, les affluents de la Jiu dans son secteur supérieur). Les plus grandes augmentations sont spécifiques aux stations dont le régime du débit a été au fil du temps influencé par les aménagements anthropiques (dérivations de l'eau d'un bassin à l'autre). Du total de 54 de stations analysées, 24 n'ont pas eu des tendances significatives.

#### 5.2.1.4. La tendance des débits maximaux annuels

Les débits maximaux annuels correspondent toujours au débit de pointe de la crue annuelle à une station hydrométrique. Ils sont, ainsi, des débits des événements extrêmes qui marquent la dynamique hydro-sédimentaire au niveau d'une année, car il est connu que pendant les périodes des plus grandes débits liquides d'une année, les rivières mobilisent la plupart des alluvions. La variabilité pluriannuelle en ce qui concerne le débit liquide maximal d'une rivière peuvent être mis en évidence par une approche similaire à celle que nous avons avec les débits annuels moyens. Dans ce sous-chapitre, nous avons donc envisagé d'appliquer l'analyse des tendances au moyen du test non paramétrique de Mann-Kendall et de la pente Sen pour les débits maximaux annuels des mêmes 54 stations considérées dans le sous-chapitre précédent ont été effectuées. Nous mentionnons que les débits maximaux annuels utilisés dans cette analyse représentent les débits moyens quotidiens les plus élevés de chaque année.

Les résultats de l'application du test MK ont été synthétisés dans le **Tableau V.5**.

**Tableau V.5.** La synthèse des résultats du test Mann – Kendall et de la pente de Sen pour les stations hydrométrique du bassin de la rivière Jiu (débits maximaux annuels)

No.	Station hydrométrique	Rivière	Période de mesure	Résultats du test Mann-Kendall			Pente du Sen	95% Conf. interval	
				niveau	Z	p		Min	Max
1	Albești	Amaradia	1953 - 2013	*	-2.294	0.022	-0.762	-1.431	-0.087
2	Baia de Aramă	Bulba	1993 - 2013		0.876	0.281	0.039	-0.095	0.194
3	Baia de Fier	Pârâul Galben	1982 - 2013	***	4.038	<0.0001	-0.281	0.153	0.445
4	Balanesti	Gruiu	1988 - 2013		0.970	0.332	0.076	-0.093	0.305
5	Bărbățeni	Jiu de l'Ouest	1954 - 2013		-0.448	0.655	-0.084	-0.504	0.392
6	Breasta	Raznic	1955 - 2013		-1.260	0.208	-0.343	-0.937	0.125
7	Brebina	Brebina	1988 - 2013		0.970	0.332	0.171	-0.200	0.620
8	Broșteni	Motru	1955 - 2013	*	-2.099	0.036	-0.788	-1.579	-0.070
9	Bustuchin Câmpu lui	Amaradia	1994 - 2013		-0.357	0.721	-0.065	-0.581	0.285
10	Neag	Jiu de l'Ouest	1957 - 2013		-1.535	0.125	-0.217	-0.475	0.050

11	Celei	Orlea	1953 - 2013		-1.644	0.100	-0.089	-0.194	0.015
12	Ciocadia	Ciocadia	1982 - 2013		1.038	0.299	0.157	-0.157	0.580
13	Closani	Motru	1966 - 2013	*	-2.391	0.017	-0.260	-0.499	-0.051
14	Corcova	Coșuștea	1955 - 2013	*	-2.269	0.023	-0.561	-0.991	-0.070
15	Dărănești	Bănița	1974 - 2013	*	-2.155	0.031	-0.118	-0.272	-0.012
16	Fața Motrului	Motru	1951 - 2013		-0.985	0.325	-0.755	-2.352	0.737
17	Filiași	Jiu	1951 - 2013	+	-1.901	0.057	-2.941	-5.921	0.136
18	Godinești	Tismana	1954 - 2013	**	3.259	0.001	0.413	0.160	0.610
19	Iscroni	Jiu de l'Ouest	1955 - 2013		-1.167	0.243	-0.324	-1.025	0.300
20	Jieț	Jieț	1960 - 2013	***	-4.056	<0.0001	-0.151	-0.242	-0.083
21	Lazăr	Lazăr	1975 - 2013	***	-1.983	<0.0001	-0.088	-0.167	-0.002
22	Livezeni	Jiu de l'Est	1958 - 2013	+	-1.717	0.086	-0.261	-0.605	0.050
23	Lonea	Jiu de l'Est	1972 - 2013	*	-2.341	0.019	-0.193	-0.430	-0.034
24	Lonea Taia	Taia	1965 - 2013	**	-2.983	0.003	-0.090	-0.180	-0.030
25	Motru Sec	Motru Sec	1988 - 2013	***	0.529	<0.0001	0.046	-0.184	0.320
26	Motrușor	Motrușor	1988 - 2013	***	2.028	<0.0001	0.115	0.003	0.244
27	Negoiești	Amaradia	1974 - 2013	***	-2.773	<0.0001	-0.898	-1.377	-0.263
28	Ohaba	Amaradia Pietroasă	1988 - 2013	***	1.433	<0.0001	0.170	-0.132	0.511
29	Pestera Bolii	Jupâneasa	1983-2013		-0.901	0.368	-0.029	-0.115	0.059
30	Petroșani	Maleia	1987-2013		1.459	0.145	0.025	-0.010	0.068
31	Podari	Jiu	1950 - 2013		-1.304	0.192	-0.231	-0.569	0.125
32	Pojaru	Poienita	1994 - 2013		0.000	1.000	-0.001	-0.219	0.183
33	Polatiștea	Polatiștea	1964 - 2013		-1.000	0.317	-0.028	-0.115	0.039
34	Răcari	Jiu	1976 - 2013	+	-1.732	0.083	-3.593	-7.458	0.447
35	Rovinari	Jiu	1982 - 2013		0.632	0.527	0.315	-1.224	2.000
36	Runcu	Jaleș	1951 - 2013		0.766	0.444	0.084	-0.123	0.327
37	Sacelu	Blanita	1982 - 2013	+	1.786	0.074	0.105	-0.006	0.211
38	Sadu	Jiu	1982 - 2013		1.006	0.315	0.824	-0.993	2.750
39	Scăiești	Argetoaia	2003 - 2013		-0.234	0.815	-0.067	-3.829	2.922
40	Sisesti	Coșuștea	1990 - 2013		0.719	0.472	0.315	-0.664	1.680
41	Stolojani	Jaleș	1953 - 2013		-0.650	0.516	-0.087	-0.359	0.189
42	Strâmbuta	Izvor	1966 - 2013		0.267	0.790	0.011	-0.054	0.090
43	Strehaia	Hușnița	1970 - 2013		-0.001	0.322	-0.200	-0.678	0.258
44	Târmigani	Motru	1959 - 2013	*	-2.055	0.040	-0.575	-1.205	-0.023
45	Tarnita	Brebina	1970 - 2013		-1.386	0.166	-0.539	-1.270	0.234
46	Telești	Bistrița	1957 - 2013		-0.537	0.591	-0.106	-0.550	0.400
47	Târgu Cărbunești	Gilort	1952 - 2013		-1.324	0.186	-0.529	-1.452	0.334
48	Târgu Cărbunești	Blahnița	1967 - 2013		-1.605	0.109	-0.025	-0.063	0.006
49	Turburea	Gilort	1952 - 2013		0.535	0.593	0.235	-0.620	1.078
50	Turceni	Jilț	1964 - 2013		-0.544	0.587	-0.096	-0.434	0.334

51	Vaidei	Șușița	1960 - 2013		-0.873	0.383	-0.050	-0.186	0.086
52	Valea de Pești	Valea de Pești	1987 - 2013	+	1.731	0.084	0.136	-0.017	0.287
53	Vulcan	Merișoara	1965 - 2013		-1.345	0.179	-0.022	-0.059	0.011
54	Zăval	Jiu	1963 - 2013		0.471	0.638	1.222	-4.576	6.750

Au total, 20 stations présentent des tendances à la hausse des débits maximaux annuels ( $Z$  positif), dont seulement 7 ont été statistiquement validées (à l'aide du paramètre  $p$ ). Les stations avec le niveau de significativité statistique le plus élevé sont localisées sur des petites rivières, en général, dans le karst (Pârâul Galben, Motru et Motrușor). D'autres stations dont la tendance a été positive appartient aux rivières qui ont subi l'influence des aménagements anthropiques, concrétisés par un apport substantiel d'eau d'autres bassins (les stations de Valea de Pești et Godinești). Même si d'autres stations sur des rivières plus grandes (sur la Jiu – s.h. Rovinari ou sur la Gilort – s.h. Turburea) présentent aussi des tendances à la hausse, elles ne sont pas statistiquement significatives. En ce qui concerne les tendances décroissantes, les résultats de plusieurs stations ont une significativité statistique. Pour certaines, il s'agit des stations situées en aval des secteurs où des volumes d'eau sont transférés vers d'autres bassins, vers des centrales hydroélectriques. C'est notamment le cas des stations hydrométriques du bassin de la rivière Motru, situées en aval du système complexe Cerna – Motru – Tismana (s.h. Târmigani sur la Motru, s.h. Sisesti et s.h. Corcova sur l'affluent Coșuștea), dont les volumes d'eau ont diminué en aval des secteurs de prélèvement.

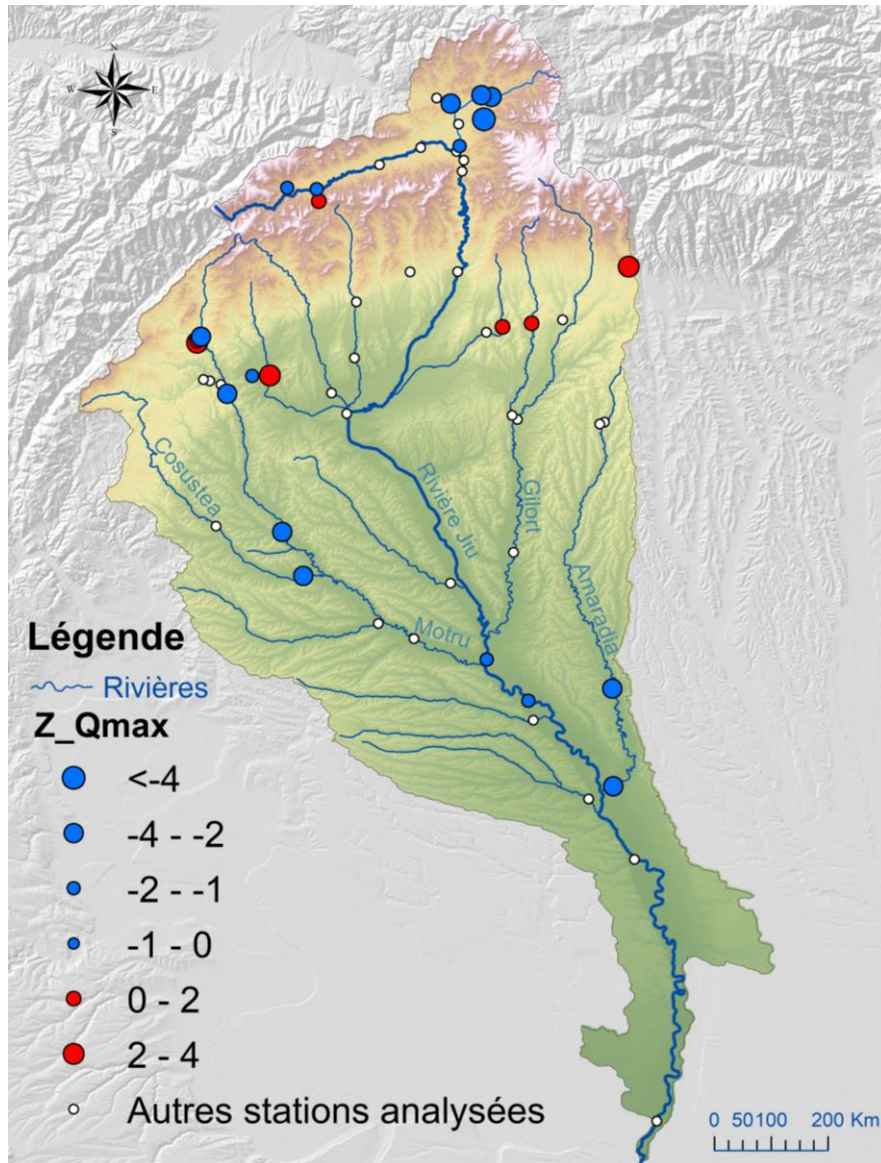
D'autres stations ayant subi une décroissance des débits maximaux annuels se trouvent dans le bassin supérieur de la rivière Jiu (toutes les stations hydrométriques dans le bassin de la Jiu de l'Est, ainsi que la station de Lazăr, sur l'affluent homonyme de la Jiu de l'Ouest). L'explication dans beaucoup de ces cas est principalement de nature anthropique, le bassin supérieur de la rivière Jiu étant depuis les années '80-'90 aménagé<sup>30</sup>: de la rivière Lazăr, l'eau est transférée par une dérivation vers le réservoir Valea de Pești, tandis que de la rivière Jieț un volume d'eau considérable est transféré vers le bassin voisin de la rivière Lotru, pour le réservoir Vidra. Les tendances décroissantes des stations hydrométriques des rivières Jiu de l'Ouest (s.h. Bărbățeni) et Jiu de l'Est (s.h. Lonea) en aval de ces travaux peuvent être partiellement liées à ces modifications dans le régime de leurs affluents, alors que les tendances sur les autres affluents (la Taia, par exemple) peuvent provenir des possibles changements climatiques ou des autres types d'interventions anthropiques dont on n'a pas la connaissance.

Les résultats de l'analyse des tendances des débits annuels maximaux sont spatialisés dans la (**Figure V.21**). On peut mieux observer le groupe de stations avec tendance négative dans le bassin de la Jiu de l'Est, ainsi que tout au long de la rivière Motru. Deux des stations hydrométriques de la rivière

<sup>30</sup> Pour une perspective générale des aménagements hydrotechniques dans le bassin de la rivière Jiu ; veuillez consulter le schéma d'aménagement de l'**Annexe 6**



Amaradia (s.h. de Negoiești et Albești) ont connu aussi une diminution importante des débits maximaux annuels, qui n'a pas été bien évidente pour les tendances des débits moyens annuels. La station hydrométrique de Baia de Fier sur la rivière Pârâul Galben a connu une forte augmentation aussi des débits liquides moyens que des maximaux annuels. Nous ne pouvons pas expliquer cette situation ni du point de vue des facteurs naturels, ni par les influences anthropiques.



**Figure V.21.** Carte du paramètre Z du test Mann – Kendall appliqué sur les débits liquides maximaux annuels aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (bleu – tendance négative, rouge – tendance positive, blanc – sans tendances, le symbole a une taille quelconque)

Les changements sur la rivière Pârâul Galben sont trop importantes pour les expliquer seulement par l'influence du régime des précipitations. En plus, cette rivière est marquée sur le schéma des aménagements hydrotechniques dans le bassin de la rivière Jiu (**Annexe 6**) comme fournisseur d'eau par

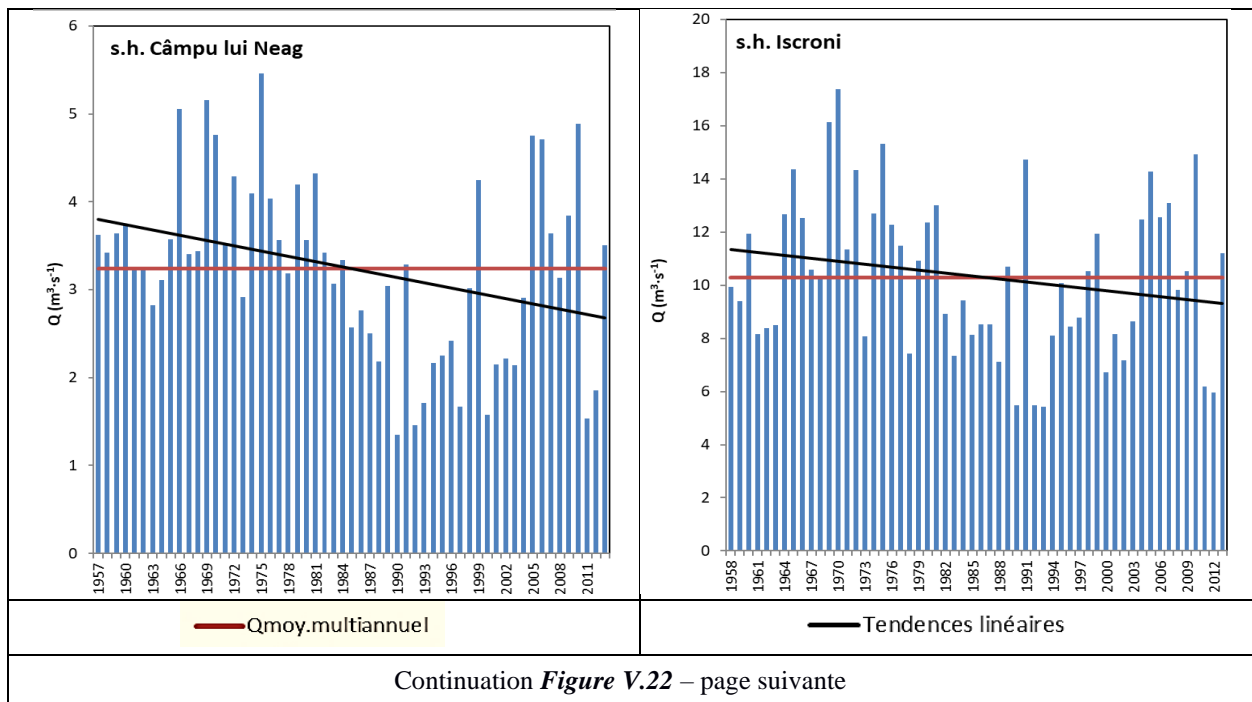
un réseau de dérivation vers le bassin voisin de la rivière Olteț, ce qui aurait dû déterminer une tendance négative des débits moyens et maximaux annuels.

A la fin de cette analyse on évoque les tendances toujours négatives, mais d'une valeur  $Z$  et d'une significativité statistique modestes des séries de débits annuels maximaux (mais aussi moyens) aux stations hydrométriques de la rivière Jiu.

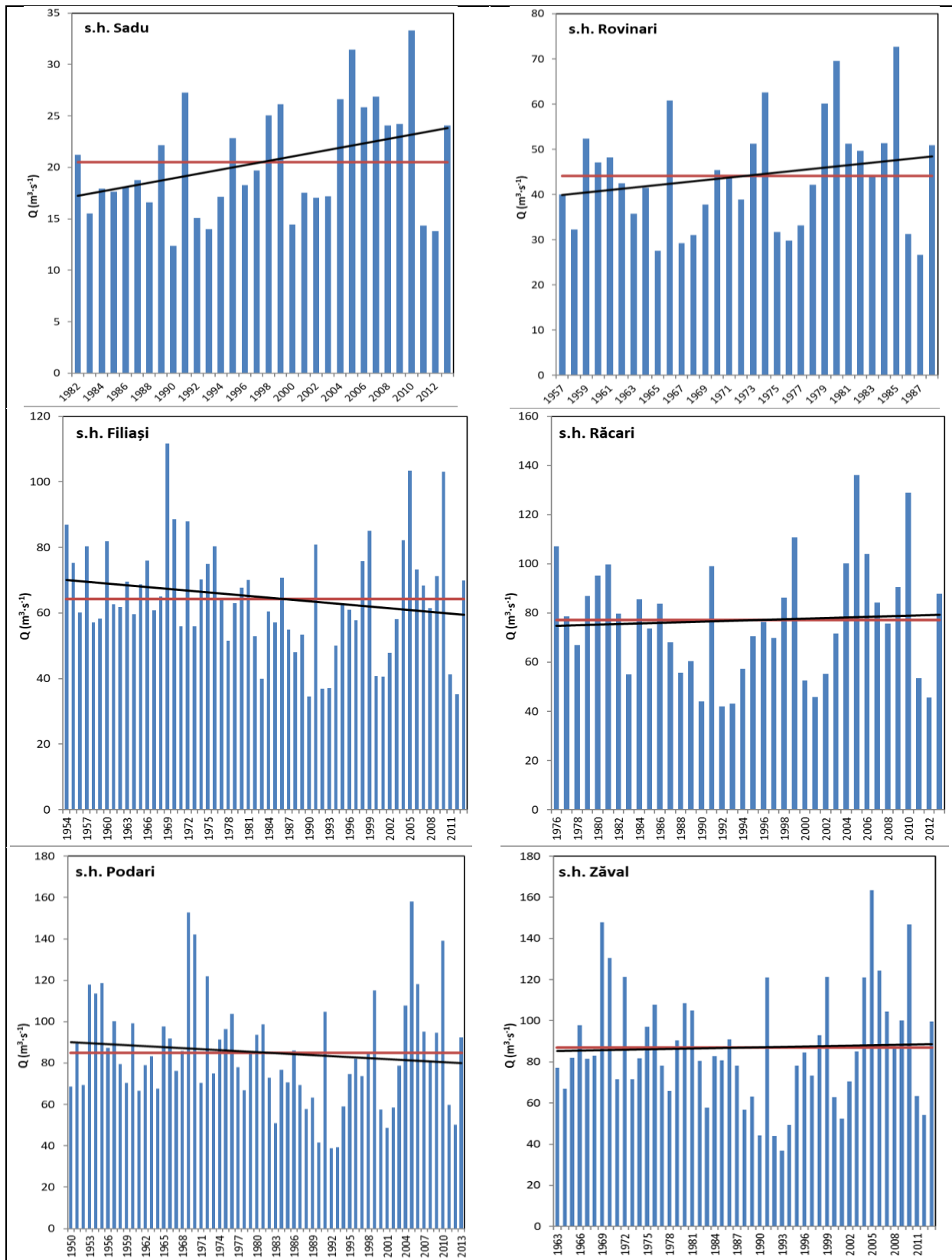
#### 5.2.1.5. La variabilité des débits liquides moyens et maximaux annuels sur la rivière Jiu

Etant donné le grand nombre de stations hydrométriques fonctionnant sur les rivières du bassin de la Jiu, nous ne pouvons pas caractériser en détail la variabilité des débits annuels. Nous avons choisi de n'analyser que 8 stations hydrométriques sur la rivière Jiu, localisées dans toutes les unités morphologiques et couvrant tout l'écart altitudinal. De l'amont vers l'aval, les stations analysées sont : Câmpu lui Neag, Iscroni, Sadu (dans le bassin supérieur) ; Rovinari, Răcari et Filiași (dans le secteur moyen) ; Podari et Zăval (dans le secteur inférieur).

Une première analyse concerne les débits *liquides moyens annuels* sur la rivière Jiu. La **Figure V.22** montre la variabilité au cours des années de ces débits moyens annuels aux 8 stations étudiées. La variabilité interannuelle des débits moyens annuels est différente d'une station à l'autre. Cela peut être mieux observé sur les pentes des tendances linéaires : les stations Câmpu lui Neag, Iscroni et Filiași présentent des tendances décroissantes, les stations Răcari et Zăval ont des tendances faibles, tandis que les stations de Sadu et Rovinari ont enregistré des croissances de leurs débits.



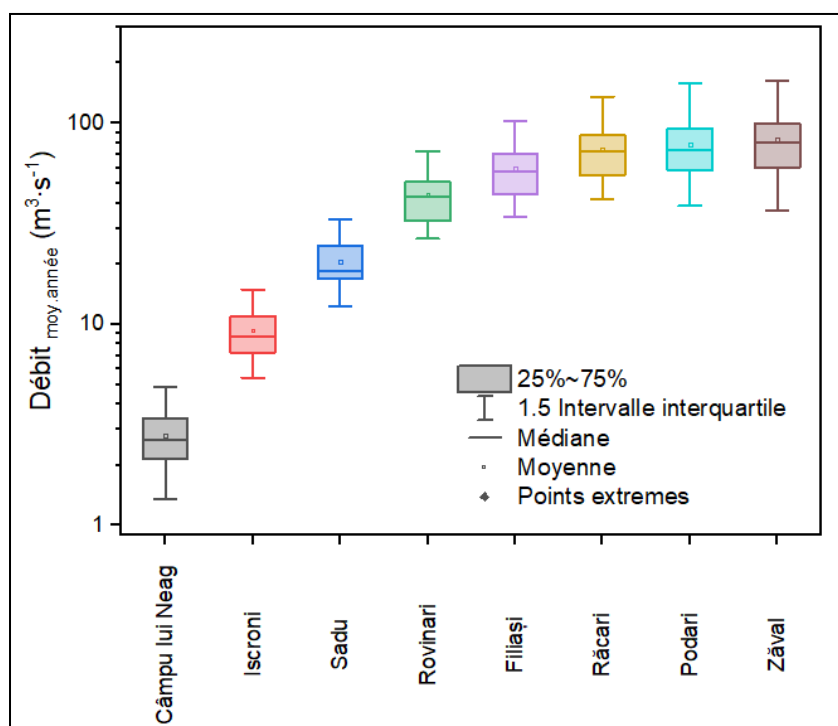
Continuation **Figure V.22** – page suivante



**Figure V.22.** Histogrammes des débits annuels aux stations de la rivière Jiu. Les lignes noires représentent les tendances de ces débits, tandis que les lignes rouges la moyenne multi-annuelle

Un aspect intéressant est l'évolution du débit moyen multi-annuel de l'amont en aval. Lorsqu'en amont d'Isroni, il se maintient inférieur à  $10 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , entre Isroni et Sadu, le débit moyen multi-annuel augmente de 10 à  $20 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , à Rovinari, il est plus que double (environ  $44 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), pour ensuite arriver à  $85 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  à Podari et se maintenir au-dessous de 90 jusqu'à l'embouchure.

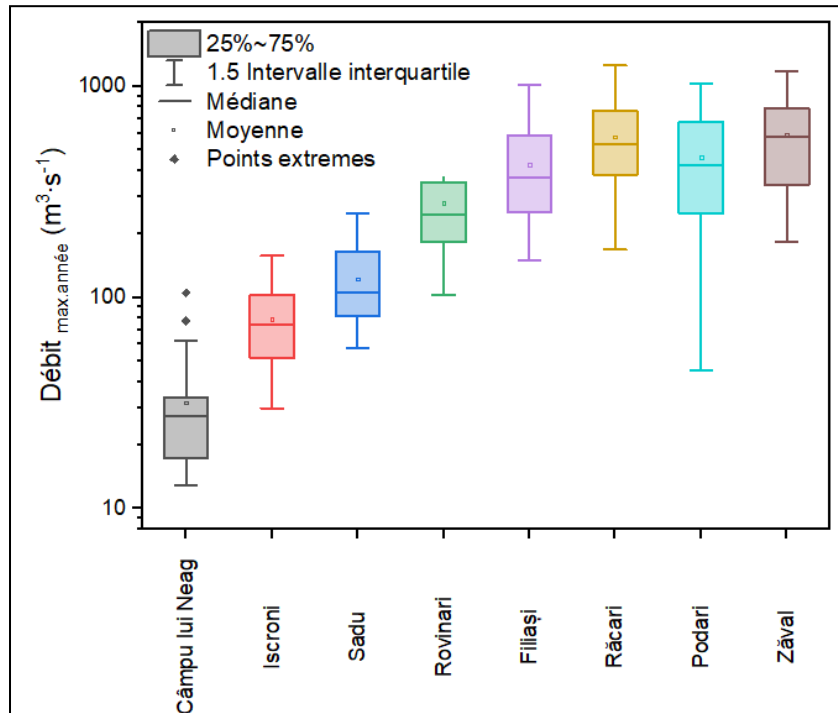
La **Figure V.23** nous permet mieux voir l'écart de variation des débits moyens annuels des 8 stations hydrométriques étudiées sur la rivière Jiu. En général, avec l'augmentation du débit moyen vers l'aval, l'écart entre les valeurs extrêmes augmente aussi. De plus, on voit mieux la pente plus abrupte de l'augmentation du débit moyen annuel sur le secteur montagneux et collinaire (en amont de la station de Filiași), pour après connaître une croissance plus lente, vers la station de Zăval.



**Figure V.23.** Variabilité spatiale des débits moyens annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu (les périodes d'analyse différentes sont mentionnées dans le **Tableau V.7**). *Débits en échelle logarithmique*

Le même type d'analyse a été réalisé pour les débits maximaux annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu (**Figure V.24**). Celle-ci montre une évolution un peu différente de l'écart entre les valeurs extrêmes et entre les quartiles : les stations de montagne (Câmpu lui Neag, Isroni, Sadu) ont un écart plus petit, développés surtout en haut, vers les débits en périodes de crues, lorsque les stations de piémont et plaine sont plus hétérogènes en ce qui concerne la gamme de débits maximales qu'elles peuvent atteindre. Plus on descend vers le secteur de plaine, plus l'intervalle interquartile est étendu, gagnant assez bien de l'espace vers les valeurs basses aussi (cela est le plus évident à la station de Podari). Même si la problématique des débits minimaux aurait pu apporter des informations pertinentes sur le régime

hydrologique de la rivière Jiu, on insiste sur les débits maximaux liquides parce qu'ils jouent un rôle très important dans la mobilisation et le transport de la matière en suspension pendant les crues.



**Figure V.24.** Variabilité des débits maximaux annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu (les périodes d'analyse sont mentionnées dans le **Tableau V.6**). *Débits en échelle logarithmique*

Une approche assez fréquemment utilisée en hydrologie pour analyser les variations d'une année à l'autre des débits moyens des alluvions en suspension consiste à déterminer le coefficient de variation ( $C_v$ ). Le  $C_v$ , également connu sous le nom de déviation standard relative (RSD), est une mesure normalisée de la dispersion d'une distribution de probabilité ou d'une distribution de fréquence [Johannes, 2009]. Il est souvent exprimé en pourcentage et défini comme le rapport de l'écart type  $\sigma$  à la moyenne  $\bar{x}$ . En hydrologie, le coefficient de variation est calculé à l'aide de la relation :

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum(k_i - 1)^2}{n}}, \text{ où } k_i = x_i / \bar{x}, \text{ et } n \text{ est l'effectif de la série [Pișota et Zaharia, 2010].}$$

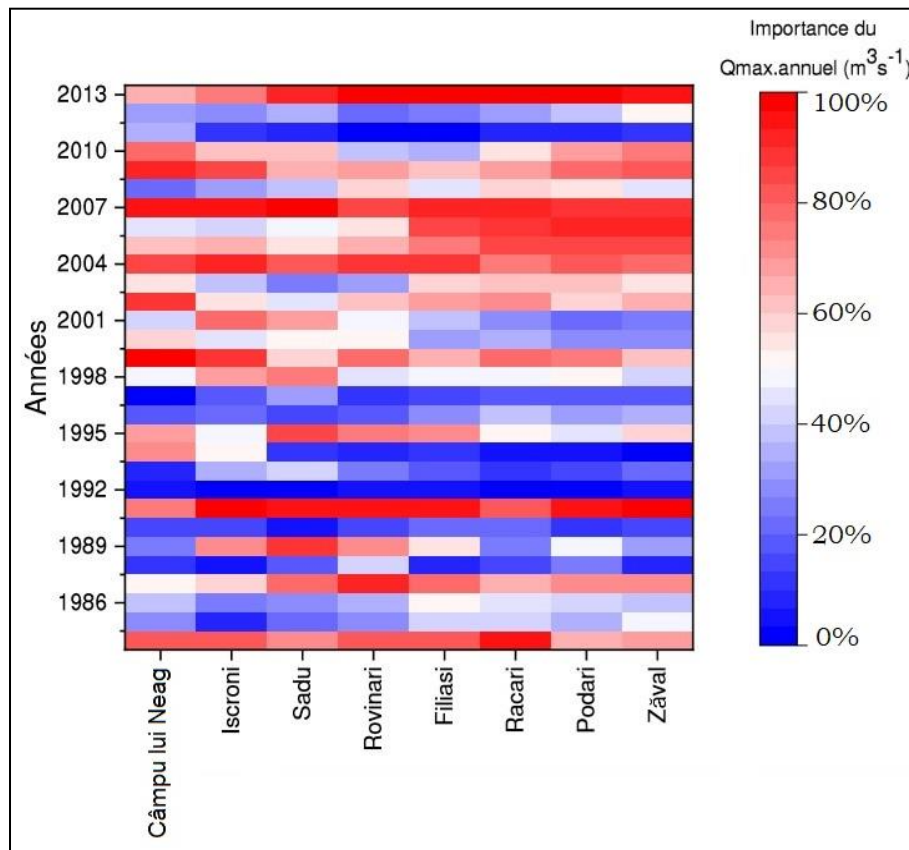
L'analyse des données du paramètre  $C_v$  des séries de débits liquides moyens annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu (Câmpu lui Neag, Iscroni, Sadu, Rovinari, Filiași, Răcari, Podari et Zăval) a montré une variabilité relativement faible d'une année à l'autre (Tableau V.6), révélée par des valeurs de  $C_v$  d'entre 0,26 et 0,31. Il n'y a pas de différence entre les stations de montagne et celles de piémont et de plaine. En ce qui concerne le coefficient de variation des séries de débits liquides maximaux annuels aux stations sur la rivière Jiu, les valeurs sont plus élevées (entre 0,39 et 0,68), mais pas avec une distribution claire de l'amont en aval.



**Tableau V.6.** Les débits liquides moyens ( $Q_{\text{moy}}$ ) et maximaux ( $Q_{\text{max}}$ ) multiannuels de la rivière Jiu et leurs coefficients de variation

No.	Station hydrométrique	Période	$Q_{\text{moy}}$	$CV_{Q_{\text{moy}}}$	$Q_{\text{max}}$	$CV_{Q_{\text{max}}}$
1	Câmpu lui Neag	1957 - 2013	3.24	0.31	127	0.68
2	Iscroni	1055 - 2013	10.28	0.28	340	0.53
3	Sadu	1982 - 2013	20.52	0.26	250	0.39
4	Rovinari	1982 - 2013	44.16	0.27	582	0.42
5	Filiași	1951 - 2013	64.31	0.26	1450	0.47
6	Răcari	1976 - 2013	77.08	0.30	1254	0.44
7	Podari	1950 - 2013	85.00	0.30	1950	0.54
8	Zăval	1963 - 2013	86.97	0.32	1640	0.45

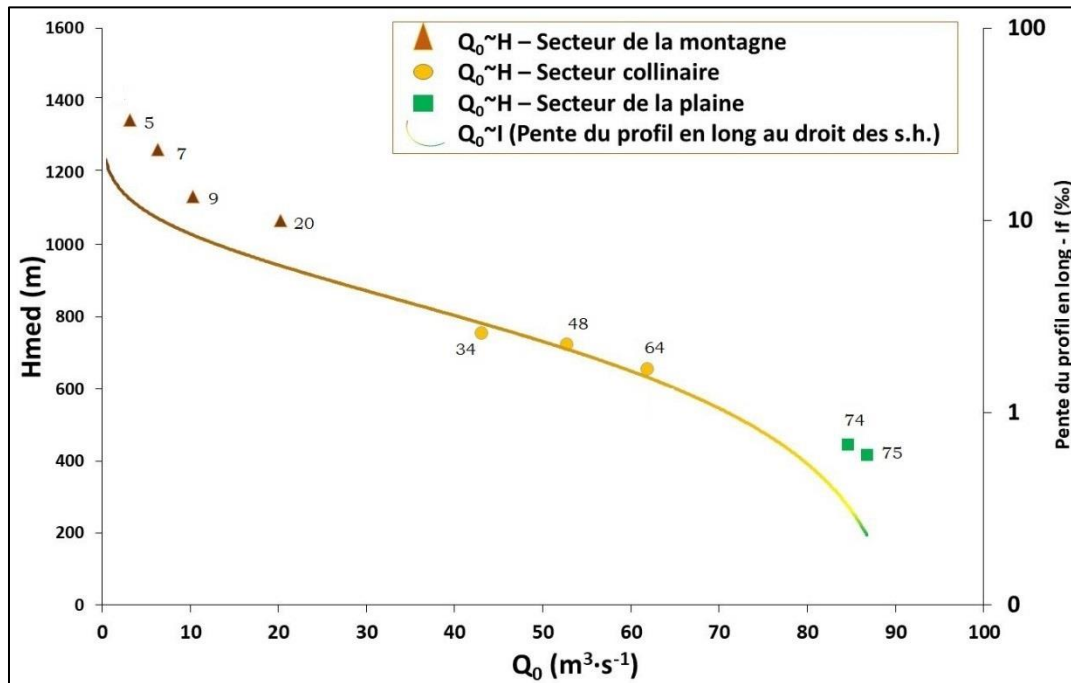
Afin de mettre en évidence les années les plus importantes, nous avons ordonné les débits maximaux annuels de la période commune d'analyse 1983 – 2013 des 8 stations hydrométrique sur la rivière Jiu, nous avons accordé des rangs de 1 à 30 aux années suivant cet ordre du plus bas au plus haut débit maximal annuel et nous avons réalisé la carte tabellaire sur leur importance (en pourcentages) de chaque année (*Figure V.25*). L'importance du débit maximal annuel est représentée en ordre croissante de bleu à rouge.



**Figure V.25.** Classification des années de la période 1983 – 2013 selon la magnitude des débits maximaux annuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu

On note les débits maximaux annuels plus bas dans la première moitié de la période d'analyse, tandis qu'après les années 2000, les crues ont commencé à atteindre des débits de pointe de plus en plus élevés, surtout dans les années 2005 – 2007 et 2013. On remarque aussi des différences entre les années avec les débits maximaux les plus élevés aux stations de montagne, par rapport à celles de piémont et plaine.

Nous avons aussi analysé la variation spatiale du débit moyen multiannuel ( $Q_0$ ,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ) des stations hydrométriques le long de la rivière Jiu, en relation avec l'altitude moyenne du bassin versant en amont ( $H_{med}$ , m) et de la pente du profil en long ( $I_f$ , ‰). La **Figure V.26** montre une relation étroite et directe entre l'altitude et la pente pour les stations du secteur montagneux, tandis que dans le secteur de piémont, la relation entre les débits moyens annuels et l'altitude ou la pente n'est pas si évidente.



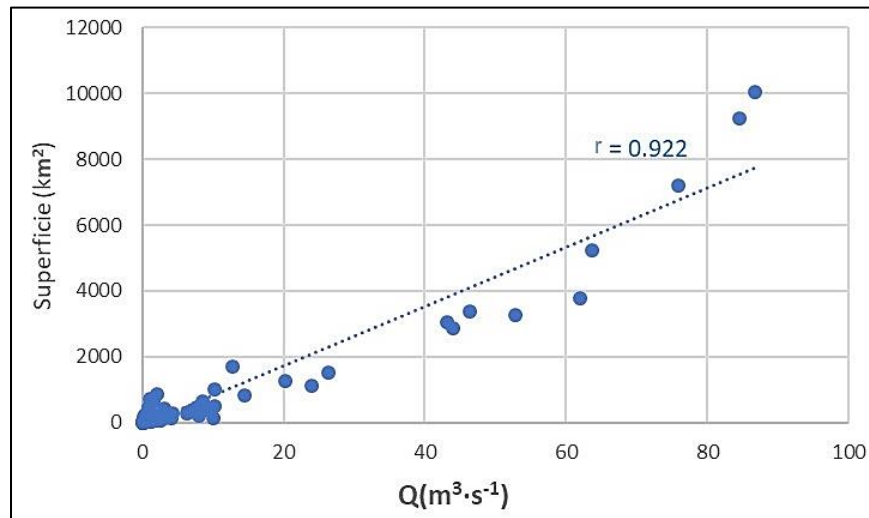
**Figure V.26.** La relation entre les débits moyens multiannuels aux stations hydrométriques de la rivière Jiu et l'altitude et la pente du profil en long. Les stations choisies sont celles qui fonctionnent encore et la période d'analyse est de 1984 à 2013. Les numéros des stations sont à trouver dans le tableau de l'Annexe 7

### 5.2.1.6. Les relations entre les débits (moyens et maximaux) multi annuels et les caractéristiques du bassin versant de la rivière Jiu

La variabilité spatiale des débits liquides est influencée par des caractéristiques du bassin versant, tels que l'altitude, la pente, la superficie, la couverture des sols, etc. Dans cette partie, nous allons analyser les relations statistiques entre certains paramètres spécifiques aux bassins versant (morphométriques et portant sur la couverture du sol) et les débits liquides, afin d'identifier la meilleure relation (fonction mathématique) qui décrit le mieux la relation entre nos variables dépendantes (un type de débit) et indépendantes (les paramètres considérés). La période d'analyse a été entre 1984 et 2013. Pour une partie des stations qui ont commencé à fonctionner quelques années plus tard (quelques stations dans les secteurs

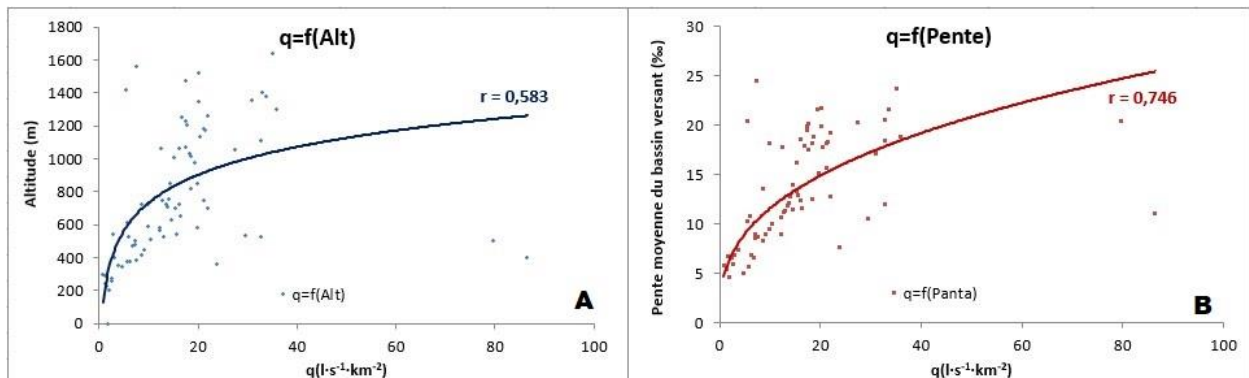
supérieurs des bassins des rivières Motru et Amaradia), nous avons étendu leurs séries de débits jusqu'en 1984, en exploitant la corrélation avec les séries des autres stations voisines, dans la période commune d'observations. Au total, 54 stations ont été valorisées dans l'analyse.

Une première relation a été réalisée entre le débit moyen multi annuel ( $Q$ ) et la superficie des bassins versants en amont des stations hydrométriques (**Figure V.27**). Une corrélation très bonne a été obtenue ( $r = 0,96$ ) entre ces deux paramètres : plus la superficie est grande, plus le débit augmente.



**Figure V.27.** La relation entre les débits moyens annuels ( $Q$ ) aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et la superficie de leurs bassins versants ( $\text{km}^2$ )

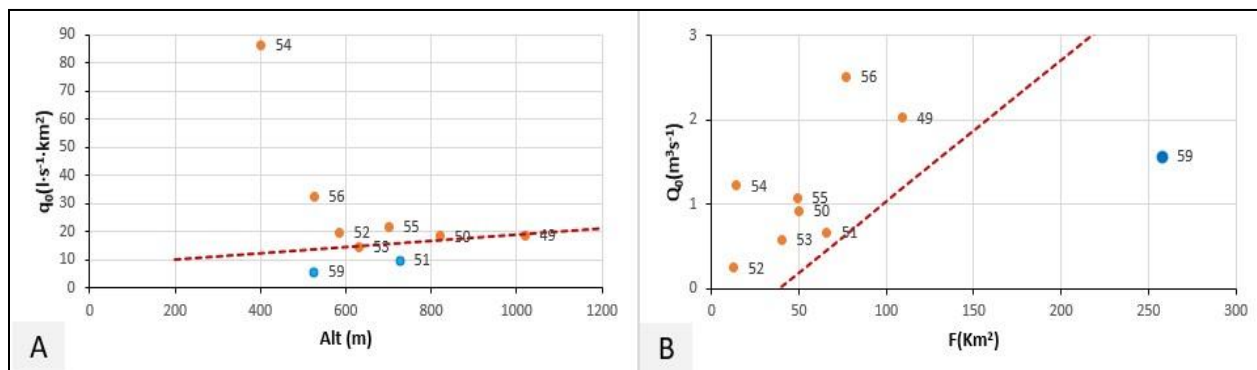
Un autre paramètre morphométrique influençant les flux liquides des bassins versant est l'altitude moyenne des bassins en amont des stations hydrométriques. Pour mieux mettre en évidence le lien entre ce paramètre et l'écoulement liquide, on a utilisé le débit moyen spécifique ( $q$ ) qui élimine l'effet de la surface. Il est obtenu en normalisant les débits moyens ( $Q$ ) à la surface des bassins (**Figure V.28**) Nous avons obtenu des relations assez bonnes (la relation type puissance a été choisie), surtout pour la relation avec la pente (le coefficient de corrélation  $r$  est de 0,75).



**Figure V.28.** La relation entre les débits moyens annuels spécifiques aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et l'altitude (A) et avec la pente du bassin versant (B)

Une autre façon d’analyser la variabilité spatiale des débits liquides est par le biais de la relation avec les facteurs morphologiques. Le long de la rivière Jiu, il est plus ou moins évident d’utiliser d’autres relations avec des facteurs d’autre nature (par exemple la couverture du sol, le facteur climatique), parce que la morphologie locale et l’altitude jouent un rôle plus important sur le débit.

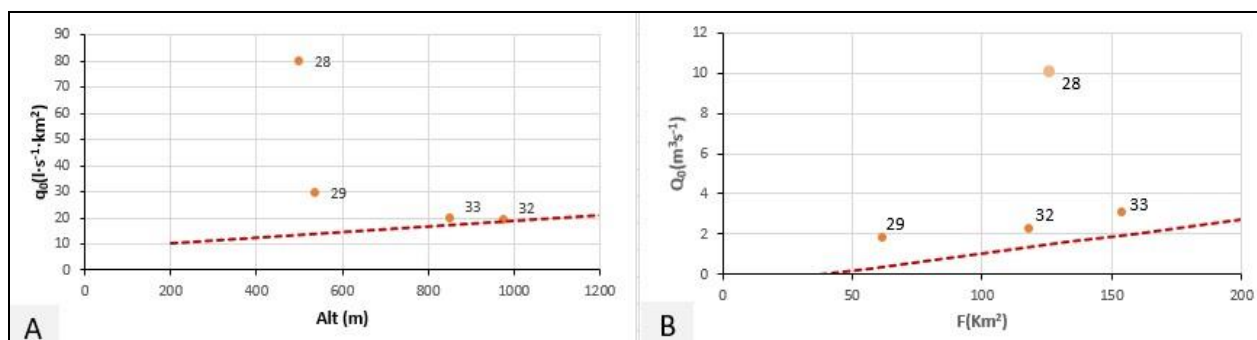
Les **Figures V.29** et **V.30** montrent des zooms sur une partie des stations hydrométriques qui ne respectent pas la relation régionale établie entre les débits liquides moyens spécifiques ( $q$ ) et l’altitude (**Figure V.29.A**), respectivement entre les débits moyens ( $Q$ ) et la superficie des bassins versants (**Figure V.29.B**). Les cas des bassins de la Motru et de la Tismana sont ainsi illustrés. Les nombres des stations correspondent à l’ordre hydrologique consultable dans les **Annexes 4 et 5** et la ligne interrompue représente la relation régionale dans le bassin de la rivière Jiu.



**Figure V.29.** La région du système karstique Mehedinti dans le bassin supérieur de la rivière Motru (avec son sous-bassin de la rivière Coșuștea) : **A.** Relation entre le débit moyen spécifique ( $q$ ) et l’altitude (Alt) ; **B.** Relation entre le débit moyen ( $Q$ ) et la superficie ( $F$ ). La ligne rouge interrompue indique la relation régionale de laquelle certains points s’abattent

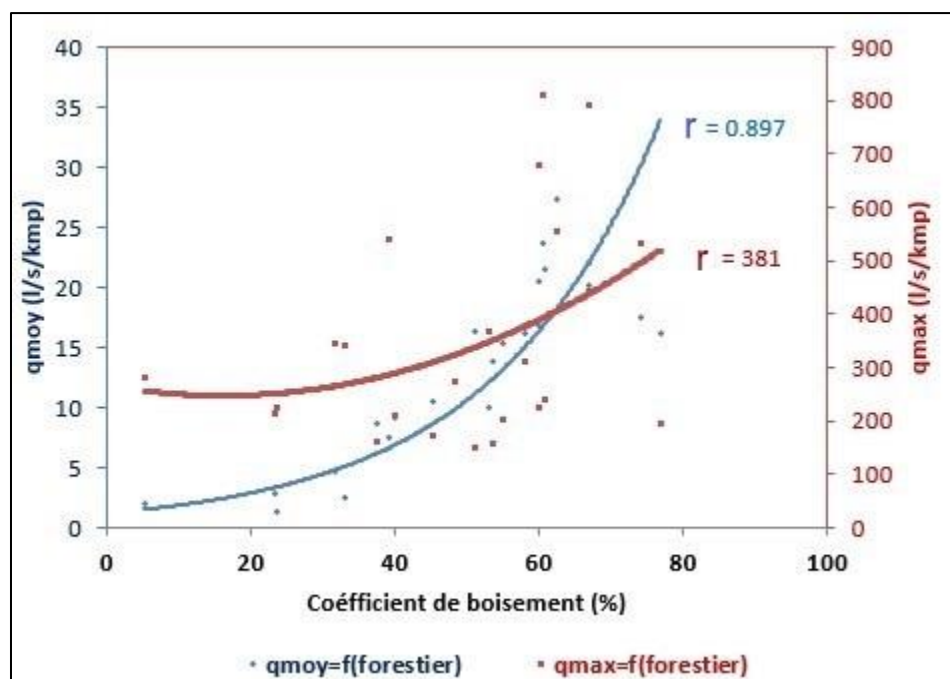
Dans le premier cas (**Figure V.29**), les débits liquides aux stations du bassin supérieur de la rivière Motru sont influencés par le système karstique, qui fait que l’écoulement est plus important que celui qui résulte de la relation régionale à la base de plusieurs dizaines de stations hydrométriques (la ligne rouge en pointillé). La plupart des stations hydrométriques sont localisées en aval des voies souterraines de l’eau avec des débits importants qui enrichissent les flux liquides à la surface par le biais des sources/ résurgences. En même temps, la rivière Coșuștea est affectée par une baisse du débit par rapport à celui considéré normal selon la relation régionale avec l’altitude ou la superficie. Dans son bassin supérieur (karstique) la rivière Coșuștea alimente le bassin voisin par l’affluent de second ordre de la Motru, la rivière Bulba, et perd des volumes importants d’eau.

Le second exemple (**Figure V.30**) porte sur le bassin de la rivière Tismana, dont les aménagements (transferts d’eau des bassins voisins) augmentent fortement les débits. La conséquence la plus notable vise la station de Godinești (celui en haut, notée avec 28), qui a un débit trop élevé par rapport à la loi régionale issue de la relation avec l’altitude et les superficies des bassins versants en amont des stations hydrométriques.



**Figure V.30.** La région du système karstique, avec des aménagements hydro-énergétiques dans le bassin supérieur de la rivière Tismana : **A.** Relation entre le débit moyen spécifique ( $q$ ) et l'altitude (Alt) ; **B.** Relation entre le débit moyen ( $Q$ ) et la superficie ( $F$ ). La ligne rouge interrompue indique la relation régionale de laquelle certains points s'abattent

Nous avons aussi analysé la relation entre les différents types de débits (moyens, maximaux) et le coefficient de boisement. Ce coefficient exprime en pourcentages, le rapport entre la superficie occupée par des forêts sur un territoire et la superficie totale du territoire. Une fois calculé ce coefficient pour les bassins versant des stations considérées dans l'analyse, nous avons procédé à l'analyse de sa relation avec les deux types de débits liquides spécifiques (moyens et maximaux multiannuels) (**Figure V.31**).



**Figure V.31.** La relation entre les débits spécifiques moyens et maximaux multiannuels aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et le coefficient de boisement (%)

Le rôle régulateur de la forêt sur la torrencialité des pluies, sur le stockage et la remise en circulation plus lente de l'eau est connu. Notre but a été non seulement de démontrer la relation entre la superficie occupée par des forêts et le débit spécifique moyen (qui était attendue directe et forte), mais aussi la relation



avec le débit spécifique maximal, qui est d'autant plus influencé par une pluie intense et prolongée lorsqu'il n'y a pas de couverture forestière pour retenir l'eau de pluie et protéger le sol. On observe une relation directe entre les débits liquides spécifiques moyens multi annuels et le coefficient de boisement (le coefficient de corrélation obtenu est très bon,  $r \sim 0,9$ ). Pour les débits liquides maximaux, la relation est plus faible ( $r \sim 0,4$ ). Même si les débits liquides maximaux ne semblent pas fortement liés au coefficient de boisement, la présence ou l'absence des forêts affecte de façon non négligeable les flux hydro-sédimentaire, en particulier l'érosion et le transfert de la matière alluviale, comme on va voir dans un sous-chapitre futur.

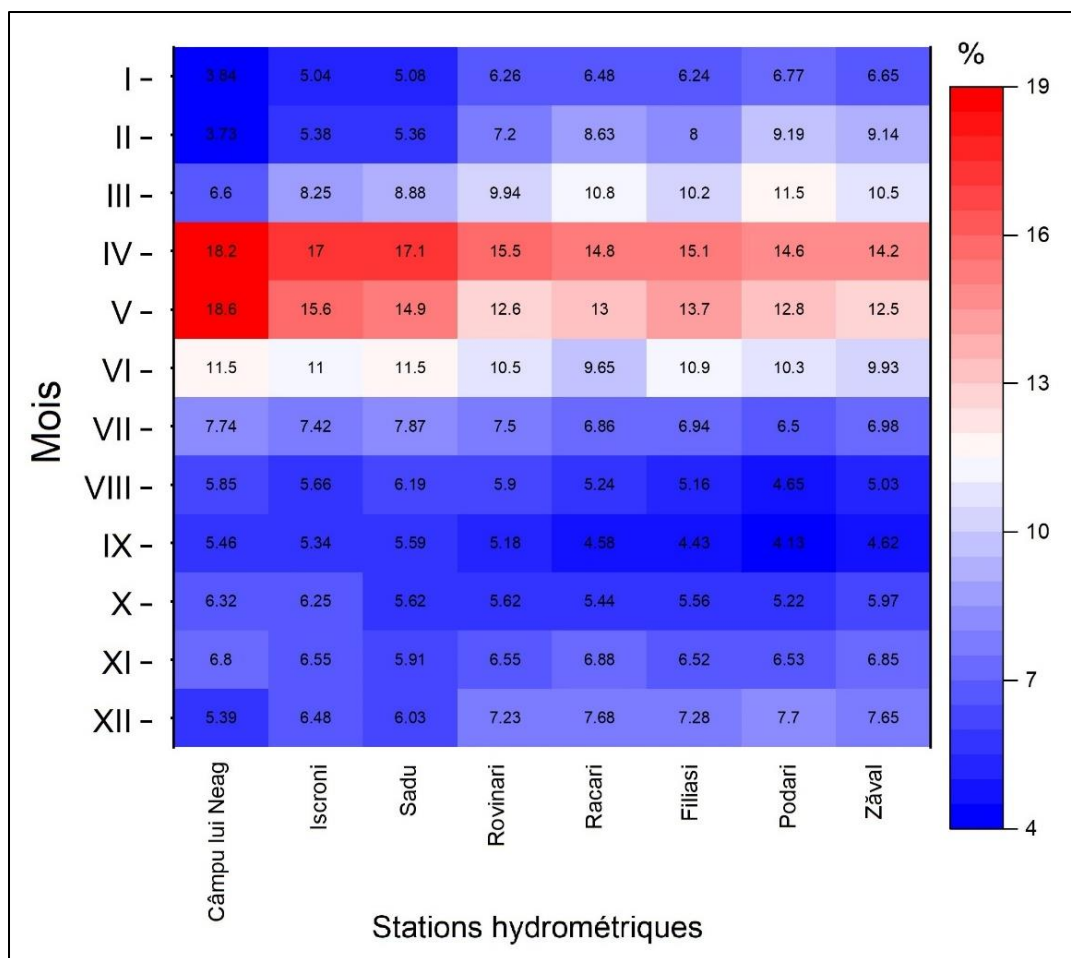
## 5.2.2. Echelle mensuelle et saisonnière

Dans le bassin de la rivière Jiu, étant donnée son extension du nord au sud entre les Carpates et le Danube et en altitude sur plus de 2000 m, la répartition mensuelle de l'écoulement est très variable d'un sous-bassin/ secteur à l'autre. Dans l'analyse de la répartition mensuelle et saisonnière des débits liquides, deux aspects ont été suivis : (i) la variation intra-annuelle à partir des volumes liquides moyens multi-annuels calculés pour chaque mois de l'année (exprimés en % par rapport au volume total moyen multi-annuel) et (ii) la variabilité de l'écoulement liquide mensuel à l'échelle pluriannuelle.

### 5.2.2.1. La variation intra-annuelle des débits moyens mensuels

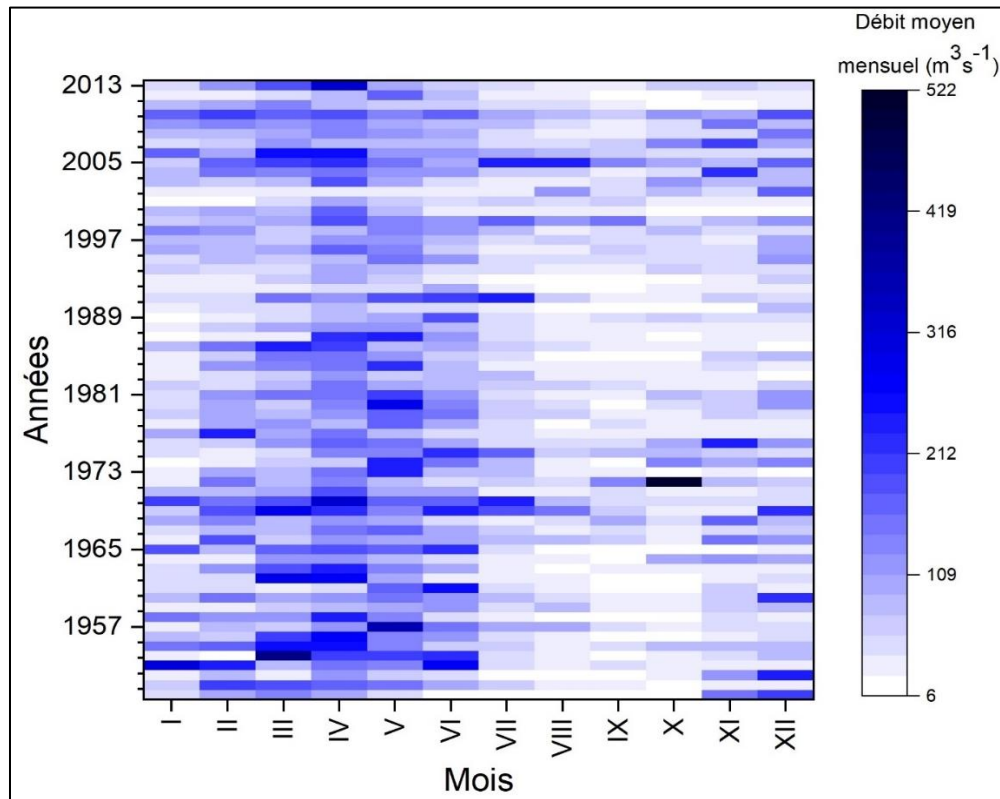
Le premier objectif (i) se propose de caractériser la variation de l'écoulement durant l'année. Les débits moyens et maximaux mensuels pluriannuels (obtenus sur la base des débits moyens journaliers) ont été utilisés. Compte tenu de l'objectif général du zonage des flux moyen et maximal à l'échelle mensuelle et saisonnière sur le territoire du bassin de la rivière Jiu, nous nous arrêterons à l'évocation de stations représentatives des différentes zones du bassin versant.

La variation mensuelle des débits moyens pluriannuels a été mise en évidence à partir des volumes mensuels moyens au cours de la période analysée (1984 - 2013), par l'estimation en pourcentage de la contribution de chaque mois au volume liquide moyen annuel (**Figure V.32**). Les débits et les volumes les plus élevés sont enregistrés en avril (de 18,2% à la station hydrométrique de Câmpu lui Neag à 14,2% à Zăval) et en mai (de 18,6% à Câmpu lui Neag à 12,45% à Zăval), suite aux pluies et à la fonte des neiges. Les minimas caractérisent les mois de janvier et février, dans le contexte de l'alimentation en eau limitée due aux précipitations généralement solides et aux phénomènes de gel sur les rivières, ainsi qu'à la contribution faible des eaux souterraines, dépourvues aussi des volumes de l'eau de la pluie. Les stations situées à la montagne présentent les plus faibles volumes d'eau en janvier (Câmpu lui Neag – 3,8 % et Iscroni – 5%). En général, la contribution des 12 mois de l'année au volume total écoulé est de plus en plus équilibrée (avec la participation de plusieurs mois) au fur et à mesure qu'on descend de l'amont vers l'aval, où les valeurs des pourcentages se rapprochent.



**Figure V.32.** La variation mensuelle des débits moyens (en % du volume moyen multiannuel) aux stations hydrométriques sur la rivière Jiu (1984 - 2013)

Prenons l'exemple de la station hydrométrique Podari sur rivière Jiu (avec les plus longues séries de données), dont les débits moyens mensuels de chaque année d'observation (1950 – 2013) ont été représentés dans la **Figure V.33**. Nous remarquons ici aussi les mois de printemps avec des débits moyens élevés, surtout dans les premières deux décennies. En général, les mois d'automne n'ont pas de débits supérieurs à  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , avec quelques exceptions, pendant les années des plus grandes crues. La plus marquante année est 1972, quand le débit moyen journalier/ mensuel maximal historique de  $522 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a été enregistré lors de la crue d'octobre. Au niveau saisonnier, le printemps est la saison qui contribue le plus au volume écoulé pendant l'année, avec des différences par rapport aux autres saisons plus nettes avec l'augmentation de l'altitude (43% du volume total à la station Câmpu lui Neag). Aux stations hydrométriques de la région montagneuse (Câmpu lui Neag, Iscroni et Sadu), le volume estival représente environ 20% du volume annuel moyen, ce qui fait qu'au printemps et en été s'écoule à peu près de 2/3 du volume annuel moyen. Aux stations situées à l'extérieur des Carpates, les volumes d'eau écoulés en hiver et en été occupent la deuxième place avec des pourcentages similaires (entre 20% et 24%).

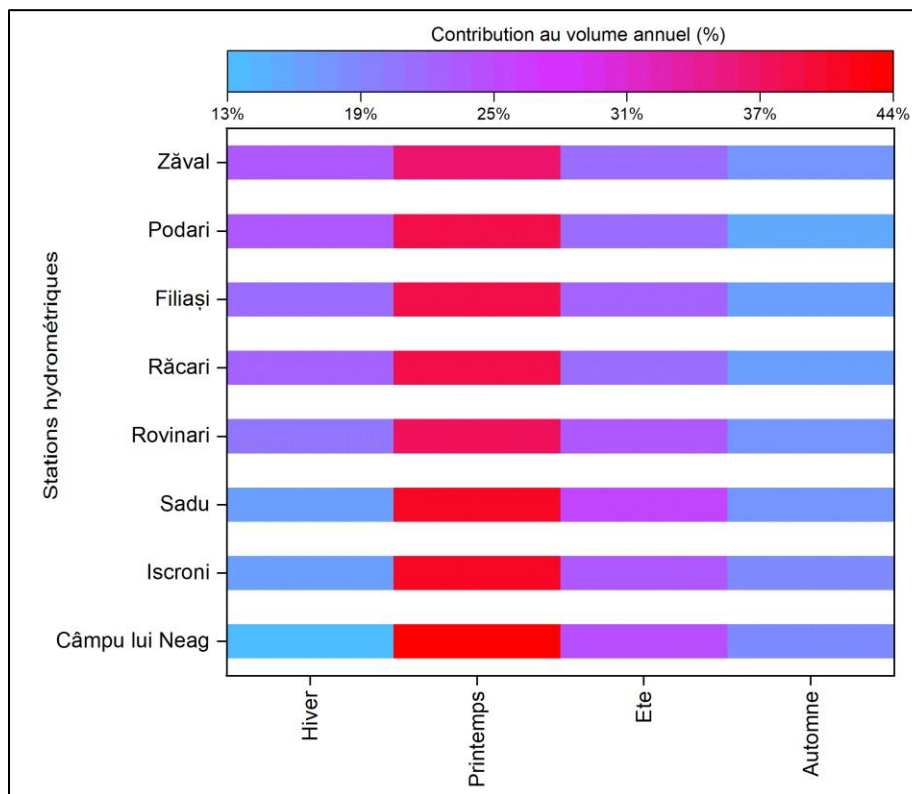


**Figure V.33.** La variabilité des débits moyens mensuels à la station hydrométrique de Podari, la rivière Jiu (1950 – 2015)

Les mois d'automne sont généralement les plus pauvres en termes des flux liquides, aucune station n'excédant 20% (**Figure V.34**). La seule exception est donnée par la station Câmpu lui Neag où, les volumes d'eau les plus faibles s'écoulent en hiver à cause des précipitations liquides réduites en haute altitude. Sur les affluents de la Jiu, la répartition mensuelle et saisonnière est plus hétérogène du fait de l'existence des influences des facteurs locaux (géologie, usage des sols, influences climatiques). Etant donnée le gros volume de séries de débits aux plusieurs dizaines de stations hydrométriques, nous avons décidé d'illustrer à analyser la variabilité mensuelle et saisonnière aux stations les plus proches de l'embouchure entre les affluents principaux et la rivière Jiu. Les stations représentées ont été: s.h. Livezeni sur la rivière Jiu de l'Est, s.h. Godinești sur la rivière Tismana; s.h. Turceni sur la rivière Jilț, s.h. Fața Motrului sur la rivière Motru, s.h. Turburea sur la rivière Gilort, s.h. Albești sur la rivière Amaradia et s.h. Breasta sur la rivière Raznic.

Dans la **Figure V.35** l'écoulement dans le bassin de la rivière Jiu de l'Est (à la station de Livezeni) est clairement dominé par les volumes enregistrés pendant le printemps (40,1%), suivi par l'été (28,8%) et par l'automne et l'hiver, chacun avec moins de 20%. Une répartition similaire (printemps, été, automne, hiver) peut être observé aussi pour les autres stations hydrométriques de ce bassin, avec la différence que

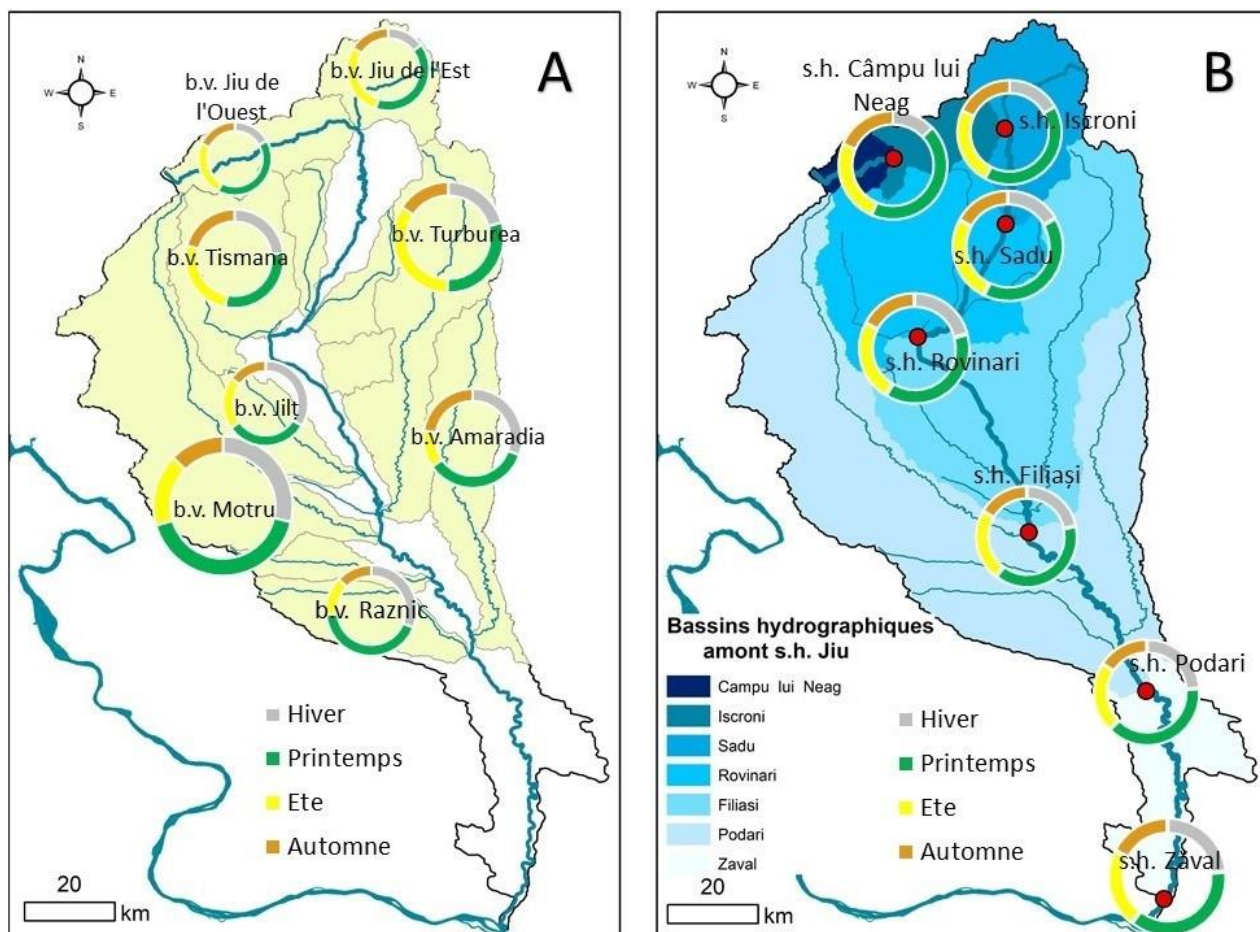
l'hiver perd de l'importance quand on va vers l'amont. À la station de Jieț sur l'affluent Jieț, plus de 70% du volume s'écoule pendant le printemps et l'été et seulement 10% en hiver.



**Figure V.34.** La variation saisonnière des volumes moyens aux stations hydrométriques sur la rivière Jiu (1984 - 2013)

En ce qui concerne le bassin de la rivière Tismana, même s'il est fortement aménagé, la variation intra-annuelle est la même, ce qui nous assure sur l'analyse de la répartition saisonnière de l'écoulement. Le régime est de type printemps, été, hiver, automne, avec les pourcentages de chaque saison très proches, entre 20% et 30% du volume moyen annuel.

Dans le bassin de la rivière Motru, l'ordre des taux saisonniers des flux liquides est : printemps (41,9%), hiver (28,7%), été (16,8%) et automne (12,7%). Le cas du bassin du bassin versant de la Motru est particulier car pendant l'hiver un volume élevé d'eau est transité, cette saison occupant ainsi la deuxième place dans l'année. Ceci est principalement dû à l'influence climatique méditerranéenne qui détermine le début précoce du printemps (depuis février). En effet, presque toutes les autres stations hydrométriques du bassin de la rivière Motru ont la même répartition de l'écoulement durant l'année, culminant avec la situation sur la rivière Coșuștea, à la station Șișești, où le volume écoulé pendant l'hiver détient 31% du total de l'année. Si le printemps se maintient comme la saison la plus riche en volume, l'été est moins important vers l'extrémité occidentale, aux stations hydrométriques influencées par le climat méditerranéen et dont l'écoulement dépend aussi du système karstique du Plateau de Mehedinți.



**Figure V.35.** La répartition saisonnière des volumes moyens des sous-bassins principaux de la rivière Jiu. **A** - les sous-bassins des affluents principaux ; **B** - les sous-bassins des stations hydrométriques sur la rivière Jiu

Le bassin de la rivière Gilort présente une distribution saisonnière de l'écoulement plus équilibrée, avec l'été qui domine (33,8%), suivie de près par le printemps (29,6%) à la station hydrométrique de Turburea. Plus en amont, le printemps devient de nouveau dominant, mais toujours en équilibre avec l'été. En tout cas, ce sont les saisons de printemps et d'été qui sont les plus importants dans ce bassin versant, caractérisé par une distribution saisonnière de l'écoulement de type : été, printemps, hiver, automne.

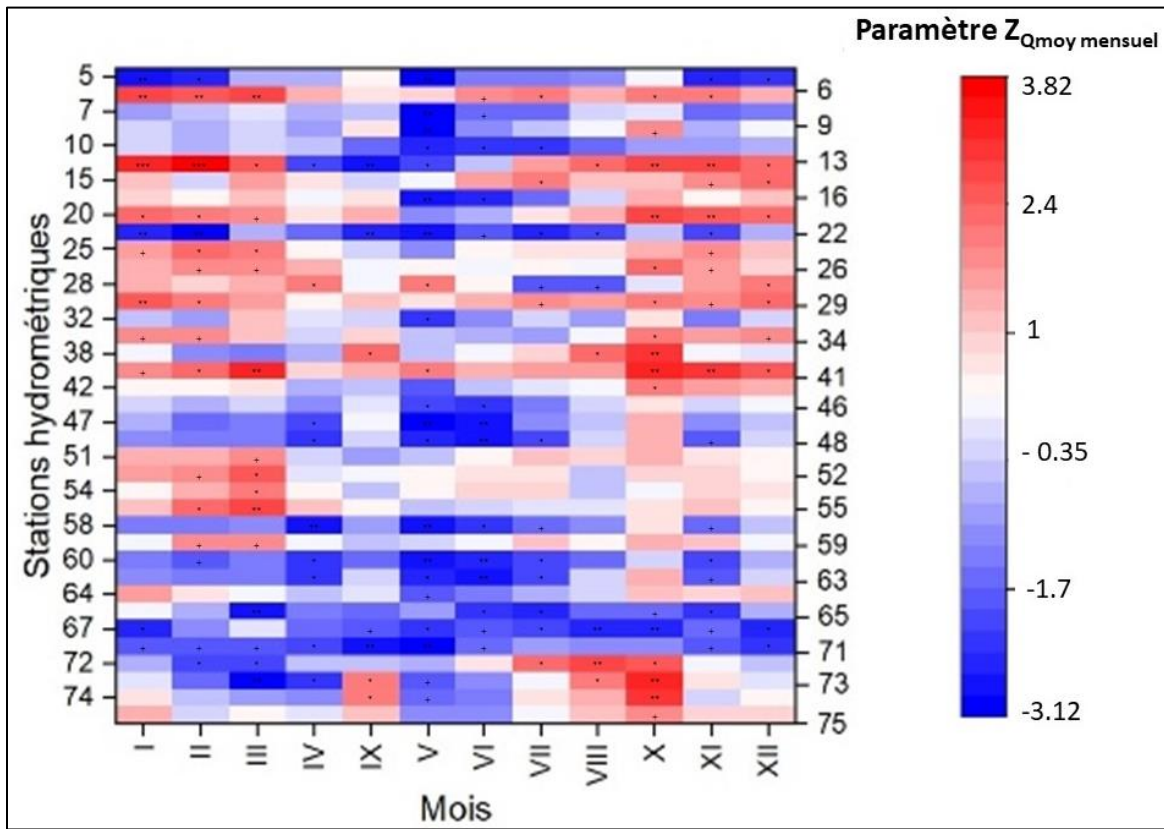
Dans le bassin de l'Amaradia, dans le secteur aval (aux stations hydrométriques d'Albești et Negoiești), le printemps et l'été ont chacune plus de 30% de l'écoulement (un régime de type printemps, hiver, automne, été). En amont, à la station de Bustuchin, la répartition saisonnière est un peu différente, les volumes les plus élevés étant enregistrés au printemps (31%). L'été occupe cette fois la deuxième place, tandis que l'hiver et l'automne sont les saisons avec les volumes d'eau les plus faibles.

Le bassin de la rivière Raznic, à la station hydrométrique de Breasta, a un régime d'écoulement dominé par le printemps (42,3%) et l'hiver (31,2%), tandis que l'automne et l'été sont plus pauvres. Etant situé au sud-ouest du bassin de la Jiu, il se peut que les influences méditerranéennes se ressentent ici aussi.



### 5.2.2.2. La variabilité inter-annuelle des débits moyens mensuels

Le deuxième objectif de ce sous-chapitre a été d'analyser les changements qui se sont produits dans la période 1984 – 2013 au niveau de chaque mois à l'aide toujours du test non-paramétrique de Mann-Kendall et de la pente de Sen. Dans la **Figure V.36** nous présentons les résultats portant sur les tendances au niveau des débits moyens mensuels. Les changements les plus significatifs correspondent aux mois de mars et juin, les mois de passage d'une saison à l'autre.



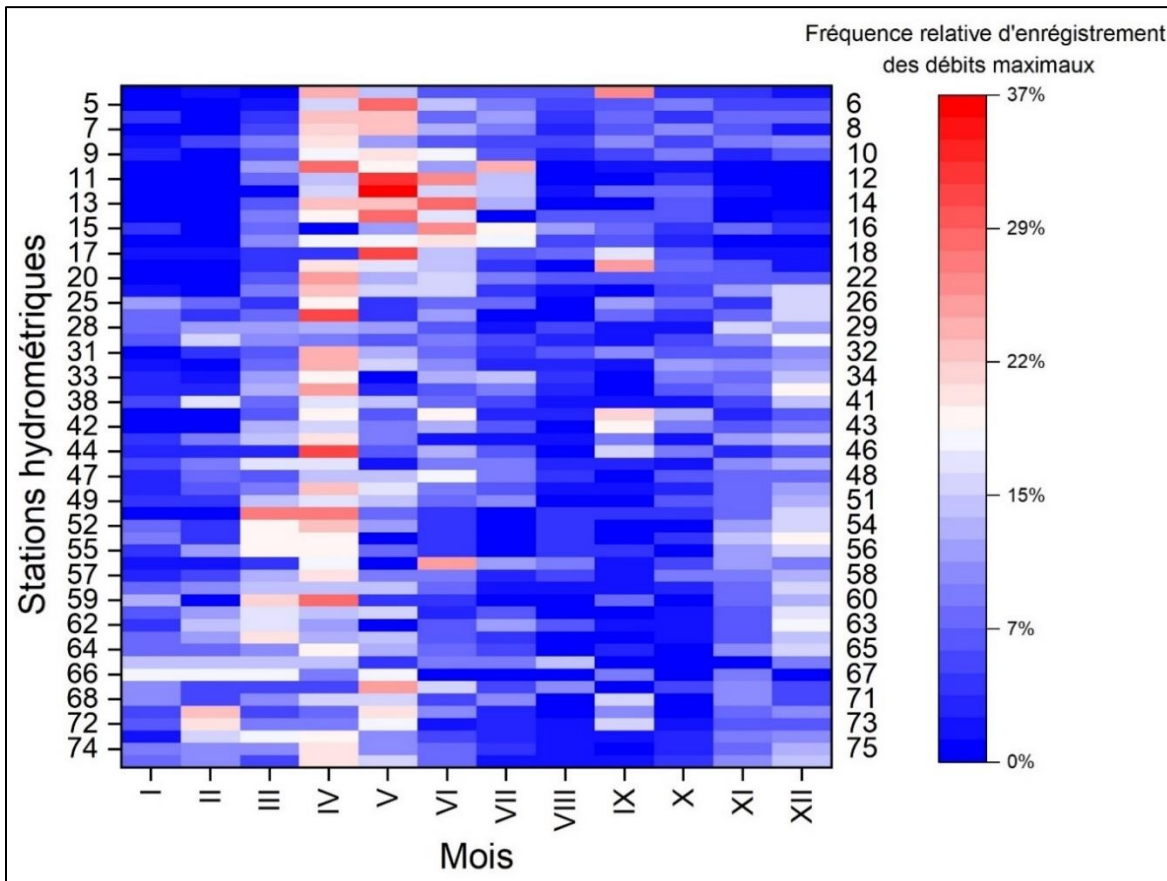
**Figure V.36.** La synthèse des résultats du test de Mann-Kendall et la pente du Sen pour les débits moyens mensuels (1984 – 2013). Les stations hydrométriques ont été numérotées en ordre hydrologique (voir l'*Annexe 7*). Notons que le symbole \*\*\* s'applique si la tendance à un  $\alpha = 0.001$  ; \*\* si  $\alpha = 0.01$  niveau de signification ; \* si tendance  $\alpha = 0.05$  et + si tendance à  $\alpha = 0.1$  niveau de significativité statistique ; si aucun signe n'apparaît au droit de la valeur du test Z, la tendance n'est pas statistiquement significative ; si manque de signe, la tendance n'a pas été significative

En mars, l'écoulement dépend des premiers épisodes de pluie de printemps généralisés sur tout le territoire du bassin, parfois sur le fond de l'apport de la fonte des neiges, dans la zone de piémont et de montagne. C'est peut-être une raison pour laquelle il y a une forte variabilité d'une année à l'autre, car l'écoulement est dépendant de cet apport supplémentaire d'eau. En juin, le mois en général le plus pluvieux, l'écoulement est dépendant du facteur climatique, qui peut varier dans le temps ; d'ici la variabilité des débits moyens mensuels aussi. En général, les tendances ont été identifiées vers la baisse des débits moyens mensuels dans la période d'analyse, à l'exception des stations en aval du système Cerna–Motru–Tismana, où les débits ont augmenté artificiellement, influencées par les aménagements hydrotechniques.

Les résultats les plus significatifs statistiquement ( $\alpha = 0.001$ ) sont pour les situations de tendance croissante des débits moyens mensuels le mois d'octobre. La tendance décroissante, également, est dans beaucoup de situations significative (notamment aux stations de l'aval numérotées de 65 ensuite), mais avec un niveau de significativité plus bas ( $\alpha = 0.01 - 0.1$ ).

### 5.2.2.3. La variabilité intra-annuelle des débits maximaux mensuels

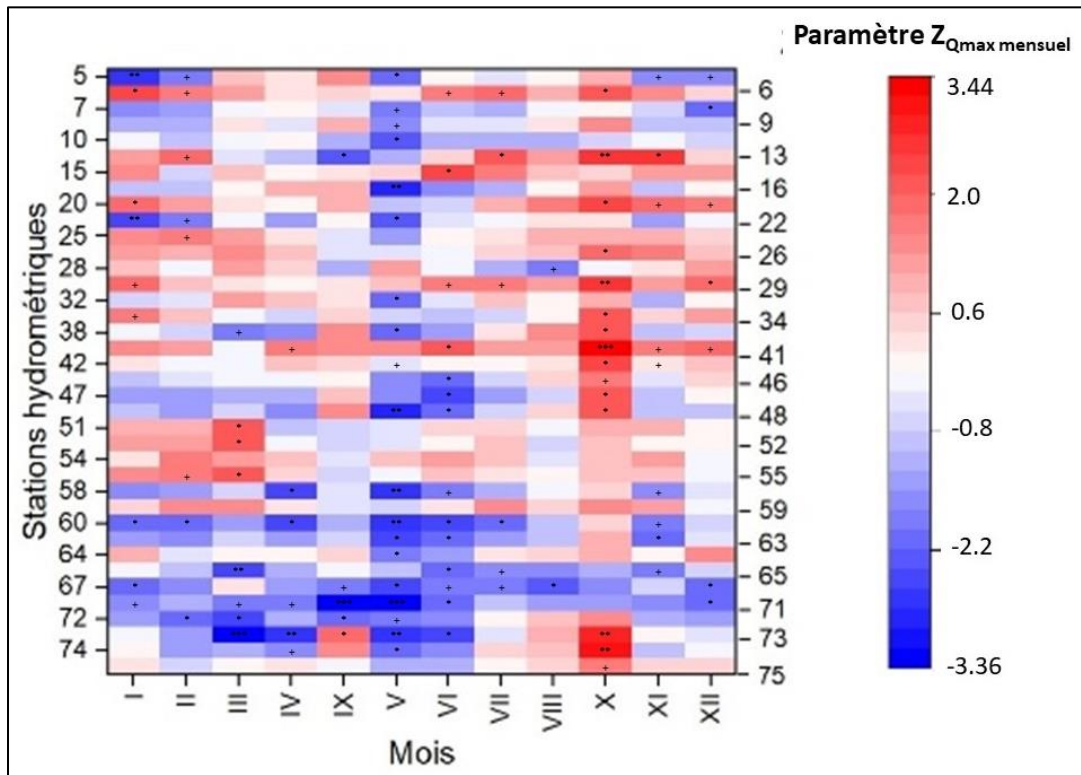
Durant une année, les débits maximaux mensuels d'intérêt sont ceux associés aux crues. Le plus grand débit maximum d'une année correspond à la crue annuelle. En ce qui concerne les débits maximaux (obtenus à partir des débits moyens journaliers), nous avons cherché à identifier les mois où les débits correspondant à la crue annuelle se sont produits, une démarche qui précède l'analyse des crues, en termes de saisonnalité. Dans ce mois où le débit maximal a été observé dans la période d'analyse à chaque station, nous avons calculé la fréquence mensuelle des débits maximaux. Dans la **Figure V.37** nous avons représenté les fréquences relative (%) de chaque mois en ,terme d'occurrence du débit maximum annuel.



**Figure V.37.** Les mois où les débits maximaux annuels se sont produits et leur fréquence (%) durant la période 1984 - 2013. Les numéros sur la verticale correspondent aux stations hydrométriques notées, en raison d'espace, à droite et à gauche en fonction de la parité de leur nombre dans l'ordre hydrologique

La figure en-dessus montre que les mois d'avril et de mai ont la fréquence d'occurrence la plus importante des débits maximaux annuels. Le mois d'août a les fréquences les plus faibles d'occurrence des débits maximaux annuels durant la période analysée. Les mois avec les fréquences les plus élevées des débits maximaux annuels (avril, mai, suivis par juin et mars) sont ceux avec la pluviosité la plus importante et vont se retrouver dans l'analyse de l'occurrence des crues dans le chapitre §5.2.3.

Nous avons procédé aussi à l'analyse des changements qui se sont produits dans la période 1984 – 2013 au niveau de chaque mois, en employant le test non-paramétrique de Mann-Kendall et la pente de Sen, afin d'identifier des possibles tendances avec leurs significativités statistiques. Les résultats portant sur les tendances au niveau des débits maximaux mensuels sont reportés dans le *Figure V.38*.



**Figure V.38.** La synthèse des résultats du test de Mann-Kendall et la pente du Sen pour les débits maximaux mensuels,  $Q_{max}$  [ $m^3s^{-1}$ ] (1984 – 2013). Les stations hydrométriques ont été numérotées en ordre hydrologique (voir l'*Annexe 7*). Notons que le symbole \*\*\* s'applique si la tendance à un  $\alpha = 0.001$  ; \*\* si  $\alpha = 0.01$  niveau de signification ; \* si tendance  $\alpha = 0.05$  et + si tendance à  $\alpha = 0.1$  niveau de signification statistique ; si aucun signe n'apparaît au droit de la valeur du test Z, la tendance n'est pas statistiquement significative ; si manque de signe, la tendance n'a pas été significative

Les tendances croissantes et significatives sont dominantes le mois d'octobre et les tendances décroissantes les plus fortes caractérisent le mois de mai. En avril, août, septembre et décembre, il y a les moins nombreuses stations avec des tendances significatives. De l'amont en aval, nous observons également que les stations de plaine et de piémont bas (les nombres d'ordre supérieurs à 60) présentent plus de mois avec des tendances significatives à la baisse, comparativement avec les autres stations à plus

grandes altitudes. Effectivement, dans la zone de montagne, les situations de tendances faibles, avec le paramètre Z du test MK et sans significativité statistique, dominent les stations hydrométriques. Une dernière remarque pourrait se faire pour les résultats du test MK des débits maximaux mensuels par rapport à ceux mensuels. Dans la présente étude, plusieurs stations hydrométriques ont des tendances décroissantes significatives pour les séries de débits liquides maximaux mensuels que pour ceux moyens mensuels. Les résultats pour les débits maximaux mensuels correspondent en général à un niveau de significativité statistique plus haut ( $\alpha = 0.001$ ), que ceux des débits moyens mensuels, ce qui dénote un changement plus important (de baisse dans la plupart des cas) des débits maximaux mensuels.

### 5.2.3. Les crues

Selon le [Glossaire International d'Hydrologie \(1992\)](#), l'onde de crue est « *une montée du débit jusqu'à un maximum, suivie d'une baisse. Elle est due à une période de précipitation ou de fonte de neige, à une rupture de barrage ou à une lâchure d'une usine hydroélectrique* ».

Les crues sont les périodes du régime hydrologique où les rivières transportent les plus importantes quantités d'eau et de matières sédimentaires. L'analyse des volumes d'eau de la durée et les moments de l'année de la plupart des crues est par conséquent un requis dans l'évaluation plus complexe du potentiel hydro-sédimentaire d'un bassin versant. Dans ce sous-chapitre, nous avons utilisé deux types de données pour satisfaire deux objectifs.

**1.** Les débits liquides moyens journaliers aux stations hydrométriques principales sur la rivière Jiu et ses affluents directs, près des embouchures, pour analyser la saisonnalité des crues et leur temps de retour;

**2.** Les débits liquides au pas de temps infra-journalier (de 1 à 6 h selon le cas), enregistrés à une vingtaine de stations sur la rivière Jiu et sur ses affluents principaux. Le choix des crues a été fait indépendamment du rang occupé dans la hiérarchie des débits de pointe ordonnés à la base de l'analyse antérieure (point 1), car l'intérêt a été d'utiliser les séries de débits horaires disponibles pour une partie des plus grandes crues. Nous avons comptabilisé 56 crues avec des données de débits horaires dans le bassin de la rivière Jiu, 24 aux stations hydrométriques sur la rivière Jiu et 32 aux stations situées sur des rivières affluentes. En utilisant les séries de débits liquides infra-journaliers, l'analyse des crues a porté sur :

**2.1.** Les paramètres statistiques de base (le débit de pointe, le temps de croissance de la crue, le temps de décroissance de la crue, le temps total de la crue, le coefficient de forme de la crue, le volume de la crue, le débit de base) ;

**2.2.** Le temps de propagation des crues, une information clé dans l'analyse des transferts des volumes d'eau et de sédiments d'un bassin à l'autre.

Nous ne disposons pas des débits d'alluvions en suspension durant les crues, mais on va se référer à ceux mesurés dans le chapitre §5.3, pour les crues durant lesquels il y avait des mesures réelles de quantité des matières en suspension (MES).

### 5.2.3.1 Caractéristiques générales des crues

Cette partie se circonscrit au premier objectif énoncé au §5.2.3, qui a été d'analyser les caractéristiques principales des crues en termes de débits maximaux et le mois/ la saison d'occurrence.

Etant donné le gros volume d'information à traiter, nous avons limité notre analyse à l'étude de 12 stations hydrométriques, dont 5 situées sur la rivière Jiu (Câmpu lui Neag – ord. hidro. 5, Iscroni – ord. hidro 9, Filiași – ord. hidro 48, Podari – ord. hidro 74 et Zăval – ord. hidro 75) et 7 autres sur ses affluents principaux (s.h. Livezeni sur la Jiu de l'Est – ord. hidro 13, s.h. Godinești sur la Tismana – ord. hidro 28, s.h. Turceni sur la Jiłt – ord. hidro 38, s.h. Turburea sur la Gilort – ord. hidro 47, s.h. Fața Motrului sur la Motru – ord. hidro 63, s.h. Albești sur l'Amaradia – ord. hidro. 72, s.h. Breasta sur la Raznic – ord. hidro 73). Afin de nos rapporter à la même période d'analyse, la longueur commune des séries de débits a été établie en fonction de la plus courte, celui de la s.h. de Turceni (1964 – 2013).

La sélection des crues a été faite selon le critère du débit moyen journalier maximum de la crue, en choisissant les 10 crues les plus importantes de chaque station hydrométrique, en ordre descendant à partir de la crue avec le débit moyen journalier maximal. Au total, 120 crues ont été retenues pour l'analyse générale de la saisonnalité, une grande partie d'entre elles étant les mêmes pour la plupart des stations. Le **Tableau V.7** résume les caractéristiques des crues analysées en termes de débits de pointe (débits moyens journaliers maximaux de la crue) et les mois d'occurrence.

**Tableau V.7.** Caractéristiques des premières 10 crues par ordre de grandeur du débit de pointe aux 12 stations sélectionnées du bassin versant de la rivière Jiu

No. Ord. hidro	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Rivière Jiu	5					1965 1970	1966 1999	2002	1975	2007 1964 1974	2009	
	9					1973	1991 1970	1966 1975		1964 1972 1974 2007	2004	
	48				2013 2006	1973 1974		1991 1969		1972	1976 2007 2004	
	74			2006 1969	2013	1973 1974		1991	2005	1972	1976 2007	
	75	2009		1969	2013 2006	1973		1991	2005	1972	1976 2007	
Af flu en	13			1981		1973 1978	1998 1970	1972 1991		1964		



						1974	1975					
28				1987 2013 1995		1991	1969		1999	1972	2004 2009 2007	
38		1984	2006	1987 2013	1973			2005	1999	1972	1976	1974
47				2013	1973 , 1987 1974	1989	1991 2005			1972 2007	2004	
63	2009		2006	1987	1980		1999 1969			1972	1976 2007	
72	1965	1984				1970	2005		1980 1974 1973	1972	1976	1982
73		1977	2006 1969	2013	1980		1970 1991		2005	1972	1976	

Le plus souvent, les crues majeures surviennent en printemps, particulièrement en avril et en mai, l'importance de ces deux mois dans la production des grandes crues augmentant de l'amont vers l'aval. En été, la plupart des crues se produisent pendant le mois de juin, le plus pluvieux de l'année, et un peu moins fréquemment en juillet, un mois assez contrastant, avec à la fois des crues dans certaines années et des épisodes de sécheresse dans d'autres années. En automne, la fréquence la plus élevée des crues est en octobre, suivi par novembre. Même si les mois de printemps sont caractérisés par les crues les plus sévères, la crue historique du bassin de la rivière Jiu pour la plupart des rivières (surtout aux stations hydrométriques du bassin moyen et inférieur) s'est produite en octobre 1972, avec un débit maximal de temps de retour supérieur à 100 ans pour la plupart des stations). En hiver les crues sont moins fréquentes. Elles se produisent en deux types de conditions : soit sur le fond des pluies automnales prolongées le mois de décembre, aux stations situées plus en aval et notamment dans la partie occidentale du bassin, dans le contexte de la circulation méditerranéenne ; soit en février, toujours aux stations aval, où les débits peuvent augmenter considérablement à cause de la fonte de neige et des précipitations liquides abondantes cumulés.

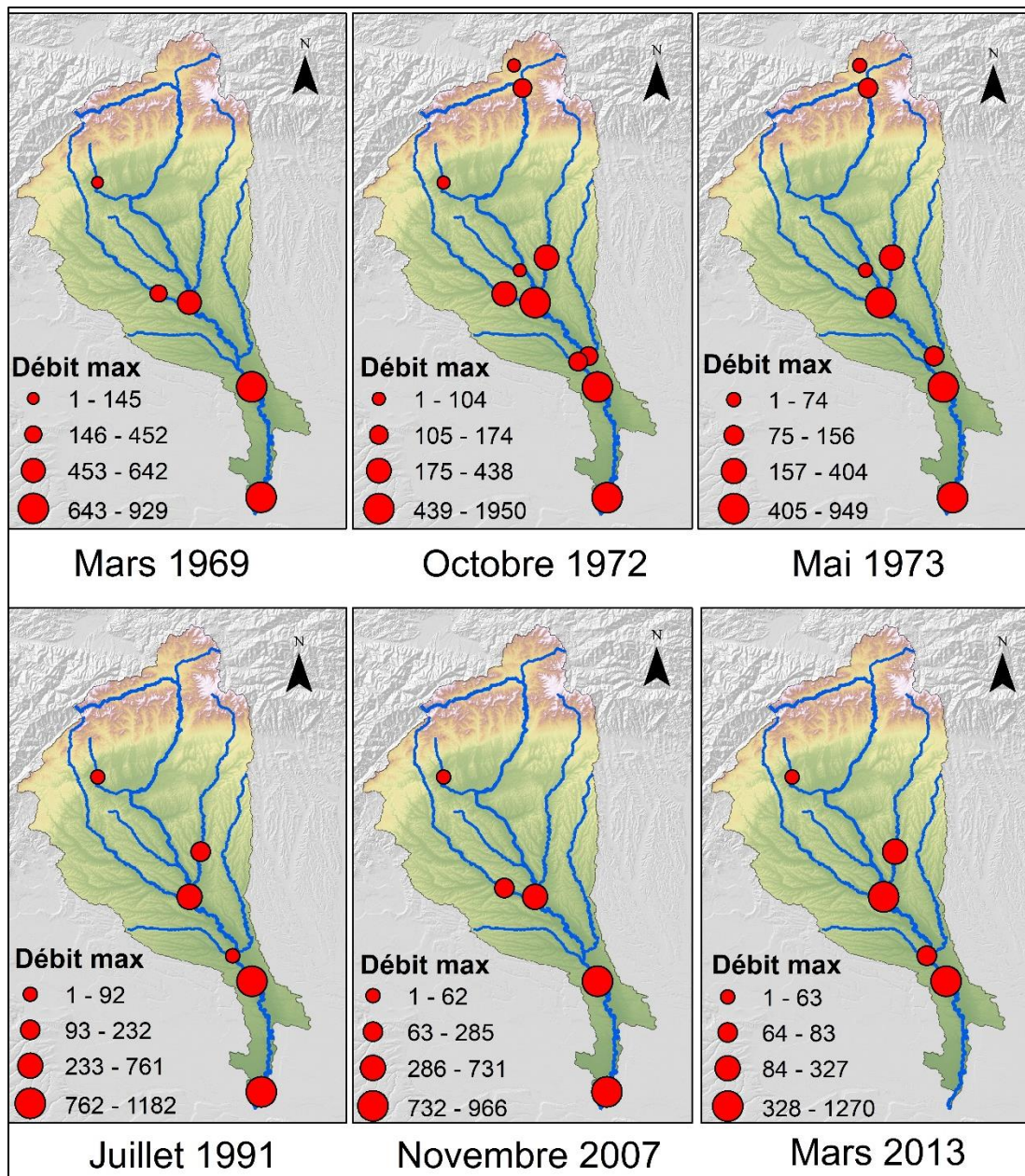
L'ordre par saisons de l'occurrence des premières 10 crues aux stations hydrométriques analysées est donnée dans le **Tableau V.8**. L'été et le printemps détiennent 10 crues parmi les plus importantes aux stations hydrométriques étudiées, alors que le printemps seulement 7 et l'hiver 5 crues. Même si en automne et hiver il semble avoir eu plusieurs crues, leur importance n'a pas été primordiale, à l'exception des crues de 1972 et 2007, très violentes et généralisées sur le bassin versant de la rivière Jiu. D'autres crues concernant la plupart des stations hydrométriques, qu'elles soient en amont ou dans le secteur aval se sont passées en printemps et au début de l'été (les crues des années 1969, 1991, 2013 etc).

**Tableau V.8.** Synthèse statistique des plus grandes 10 crues en termes de saisonnalité

	Printemps	Eté	Automne	Hiver
--	-----------	-----	---------	-------

<b>No. Crues</b>	7	10	10	5
<b>No. s.h. dont la crue a eu le débit maximal absolu</b>	3	4	5	0

Les plus importantes 6 crues ont été spatialisées en termes de débits enregistrés aux stations hydrométriques analysées (*Figure V.38*). Nous observons la répartition des débits maximaux parmi les 12 stations hydrométriques analysées et d'où les crues semblent provenir. La crue de mars 1969 s'est probablement formée principalement dans le bassin de la rivière Motru et ensuite dans le bassin de la rivière Tismana. La crue d'octobre 1972 semble provenir de partout, étant donnée le débit maximal de la crue parmi les premiers 10 dans toutes les stations hydrométriques étudiées.



**Figure V.38.** La spatialisation des 6 plus grandes crues aux stations hydrométriques analysées ( $Q_{\max} - m^3s^{-1}$ )

La crue de mai 1973 provient le plus probablement du secteur supérieur de la Jiu et en moindre mesure de la Gilort. La crue de juillet 1991 s'est propagée plutôt du bassin de la rivière Tismana et de la Gilort, mais une contribution assez importante semble l'avoir eue aussi le bassin de la rivière Raznic. En ce qui concerne la crue de novembre 2007, elle semble provenir du secteur moyen occidental du bassin de la rivière Jiu, les rivières les plus contributives étant la Motru et la Tismana. Enfin, la crue de mars 2013 provient dans la plupart des sous-bassins de la Tismana, de la Gilort et de la Raznic.

\*\*\*

Ce type d'approche méthodologique peut être menée à différentes échelles spatio-temporelles : à l'échelle des crues (en utilisant les débits moyens journaliers ou les débits horaires) et à l'échelle des sous-bassins de la rivière Jiu. Cependant, il faudra éliminer l'effet des différences de débits entre les rivières les plus petites (i.e. Raznic) et ceux des rivières les plus grandes, aux stations hydrométriques en aval des bassins versant (i.e. la station Podari sur la Jiu). Différentes méthodes pour surmonter ces défis seront présentées dans le chapitre §7, à l'échelle journalière des crues.

#### 5.2.3.2. *Caractérisation des ondes de crue*

Pour la caractérisation des ondes de crues, nous avons utilisé les débits mesurés à pas de temps infra-journalier, pour 23 stations hydrométriques, selon la base de données qui a été mise à notre disposition par l'INHGA. Le traitement statistique des ondes de crues a supposé premièrement d'établir les moments de début et fin des crues enregistrées dans les fiches de crues aux stations hydrométriques analysées. Ces moments ont été établis en fonction des valeurs des débits et la forme de l'hydrogramme sur la base desquels nous avons délimité les ondes de crue.

Les paramètres caractéristiques des ondes de crues ont été calculées en suivant la méthodologie de Pişota et Zaharia (2010), avec des compléments de Corbuş (2010) et Arnold *et al.* (1995). L'analyse statistique des crues peut fournir des informations sur de nombreux paramètres statistiques, y compris l'écoulement de base et la séparation des apports souterrains et de l'écoulement direct [Corbuş, 2010]. Pour chaque crue, nous avons choisi de calculer les paramètres suivants : le débit de pointe ( $Q_{max}$ ,  $m^3s^{-1}$ ) et son moment d'enregistrement; le temps de croissance de la crue ( $T_c$ , h) ; le temps de décroissance de la crue ( $T_d$ , h) ; la durée totale de la crue ( $T_t$ , h) ; le volume durant la période de montée de la crue ( $W_c$ , millions de  $m^3$ ) ; le volume durant la période de décrue ( $W_d$ , millions de  $m^3$ ) ; le volume total de la crue ( $W_t$ , millions de  $m^3$ ) ; le coefficient de forme de la crue ( $\gamma$ ) et la lame d'eau ruisselée ( $H_s$ , mm).

$$W = Q_{max} \cdot T_t \cdot \gamma \cdot 3600$$

$$h = \frac{w}{1000 \cdot s}$$

$$\gamma = \frac{w}{(Q_{max} - Q_b) \cdot T_t}$$

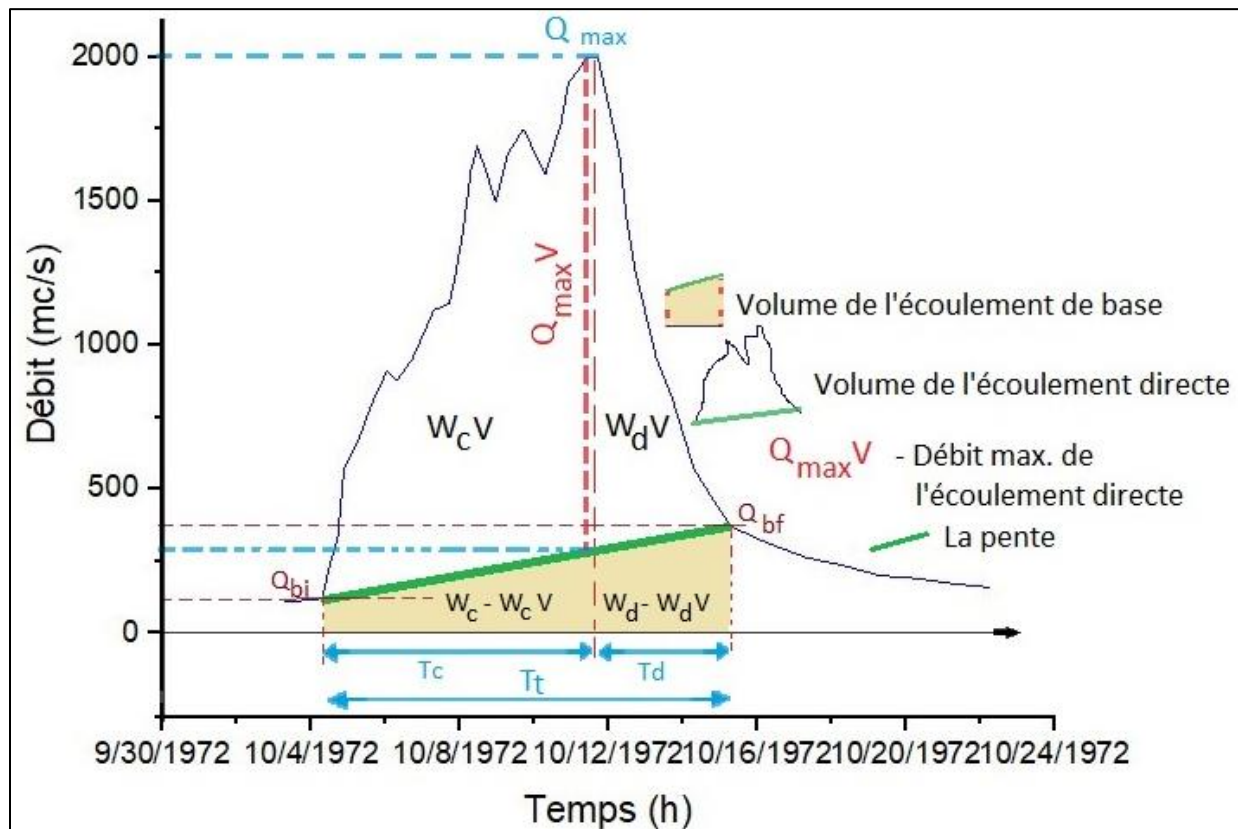
$W$  = le volume maximal de la crue (mil.  $m^3$ ) ;  $Q_{max}$  = le débit maximal ( $m^3s^{-1}$ ) ;  $Q_b$  = le débit de base ( $m^3s^{-1}$ ), dont  $Q_{bi}$  – le débit de base initial et  $Q_{bf}$  - le débit de base à la fin de la crue ;  $T_t$  = le temps total (s) ;  $\gamma$  = le coefficient de forme de la crue ;

Une étape essentielle dans le calcul des caractéristiques des crues est la détermination du débit de base, défini comme l'apport de la composante souterraine (les aquifères qui alimentent la rivière même en période de sécheresse) [Corbuş, 2010]. Pour la détermination du débit de base nous avons opté pour le modèle à pente constante de Arnold *et al.* (1995), calculé comme :

$$Q_b(t) = Q_b(t-\Delta t) + \Delta Q_{bc}$$

où  $Q_b(t)$  = le débit de base au moment  $t$  ;  $Q_b(t-\Delta t)$  = le débit de base à un certain pas de temps dans le passé et  $\Delta Q_{bc}$  = le gradient de croissance du débit de base.

Dans la **Figure V.40** nous présentons tous les paramètres statistiques des crues calculés et la ligne de séparation du volume de base du volume de la crue selon le modèle à pente constante.



**Figure V.40.** Illustration des paramètres d'une onde de crue et du débit de base selon le modèle à pente constante (la crue d'octobre 1972 à s.h. Podari, rivière Jiu)

Suivant l'approche présentée ci-dessus, les crues sur la rivière Jiu présentent les paramètres statistiques synthétisés dans le **Tableau V.9**. Les résultats détaillés sont présentés dans **l'Annexe A.9.1**.



**Tableau V.9.** Les caractéristiques des ondes de crues aux stations hydrométriques de la rivière Jiu. *Les valeurs rapportées sont : les moyennes ( $\Delta$ ) des débits de pointe ( $\Delta Q_{max}$ ,  $m^3s^{-1}$ ) ; des durées spécifiques de la crue ( $\Delta T_c$ ,  $\Delta T_d$ ,  $\Delta T_t - h$ ), des volumes associés aux durées ( $\Delta W_c$ ,  $\Delta W_d$ ,  $\Delta W_t$ ,  $mil. m^3$ ), de la lame d'eau ruisselée ( $\Delta h$ ,  $mm$ ) ; et du coefficient de forme ( $\Delta \gamma$ )*

s.h.	No. crues	$\Delta Q_{max}$	$\Delta W_c$	$\Delta W_d$	$\Delta W_t$	$\Delta h$	$\Delta T_c$	$\Delta T_d$	$\Delta T_t$	$\Delta \gamma$
Iscroni	11	329.4	12.1	34.4	46.4	92.5	43.5	150.8	194.3	0.2
Sadu	11	268.5	12.1	45.9	58.0	46.2	43.2	138.4	181.5	0.3
Rovinari	9	472.1	56.2	105.7	161.9	56.3	68.6	140.8	209.3	0.5
Filiași	6	1061.5	169.9	183.6	353.5	67.5	83.2	187.2	270.3	0.4
Răcari	10	996.6	95.1	172.3	267.5	37.1	48.3	123.6	171.9	0.5
Podari	7	1403.1	250.0	325.8	575.8	82.7	91.9	242.4	334.3	0.4
Zăval	7	1150.4	246.3	283.1	529.4	52.7	116.6	194.9	311.4	0.4

Sur la rivière Jiu, la durée totale des crues augmente de l'amont vers l'aval d'environ 5 (à s.h. d'Iscroni) à 21 jours (s.h. de Zăval et Podari), avec des temps de croissance qui vont de 34 h (à Iscroni) à 11 jours (à la station de Zăval). Le débit maximal absolu a été de  $2000 m^3s^{-1}$  à la station hydrométrique de Podari pendant la crue d'octobre 1972.

Sur les rivières affluentes, les caractéristiques des ondes de crues étudiées sont présentées dans **Tableau V.10.** Les résultats détaillés sont présentés dans *l'Annexe A.9.2.*

**Tableau V.10.** Les caractéristiques des ondes de crues aux stations hydrométriques des affluents de la rivière Jiu. *Les valeurs rapportées sont : les moyennes ( $\Delta$ ) des débits de pointe ( $\Delta Q_{max}$ ,  $m^3s^{-1}$ ) ; des durées spécifiques de la crue ( $\Delta T_c$ ,  $\Delta T_d$ ,  $\Delta T_t - h$ ), des volumes associés aux durées ( $\Delta W_c$ ,  $\Delta W_d$ ,  $\Delta W_t$ ,  $mil. m^3$ ), de la lame d'eau ruisselée ( $\Delta h$ ,  $mm$ ) ; et du coefficient de forme ( $\Delta \gamma$ )*

s.h.	Rivière	No. crues étudiées	$\Delta Q_{max}$	$\Delta W_c$	$\Delta W_d$	$\Delta W_t$	$\Delta h$	$\Delta T_c$	$\Delta T_d$	$\Delta T_t$	$\Delta \gamma$
Târmigani	Motru	10	304.9	15.2	28.0	43.2	143.0	44	141.3	185.3	0.24
Telești	Bistrița	10	196.4	8.1	24.5	32.6	120.9	36.3	208.9	245.2	0.25
Turburea	Gilort	10	416.6	32.8	37.2	70.0	68.2	70.9	138	208.9	0.22
Turceni	Jilț	10	99.3	6.1	5.4	11.5	30.5	55.4	61.7	117.1	0.28
Breasta	Raznic	9	149	12.3	22.1	46.5	62.0	108.0	170.0	0.25	9.8
Broșteni	Motru	10	486.6	35.9	55.3	85.6	53.2	150.4	203.6	0.17	19.4
Runcu	Jaleș	10	78.1	11.2	14.2	124.6	34.8	157.4	192.2	0.27	3.1
Celei	Orlea	9	28.8	2.5	3.7	55.4	28.1	66.1	94.2	0.40	1.2
Corcova	Coșuștea	8	218.1	20.2	27.7	66.0	41.8	106.9	148.6	0.25	7.5
Stolojani	Jaleș	9	125.1	19.4	27.2	176.3	52.1	190.9	243.0	0.26	7.8
Strehaia	Hușnița	10	85.2	2.0	5.1	7.0	22.5	20.0	59.0	79.0	0.30



Dans ce cas, la durée des crues est inférieure à celle de la rivière Jiu, le maximum étant de 16 jours à la station de Fața Motrului sur la Motru. Celles-ci sont en général plus symétriques en ce qui concerne la durée de croissance et de décroissance de la crue.

### 5.2.3.3. Célérité des crues

L'intérêt de l'étude des crues a porté aussi sur la relation amont-aval entre les différentes stations hydrométriques. La célérité de l'onde de crues fait l'objet de plusieurs équations sur l'évolution du débit durant une crue, qui sont à la base de nombreuses méthodes concernant la prévision des crues [Bachet, 1934]. La célérité de l'onde est d'ailleurs à distinguer de la vitesse moyenne de l'écoulement [Hingray *et al.*, 2009]. On estime en général que la célérité de l'onde de crue est de l'ordre d'une fois et demi la vitesse de l'eau pendant une crue, donc environ 1,5 m/s (cette propriété peut être montrée à partir de l'équation de l'onde cinématique ; elle est illustrée par exemple par l'hystérésis antihoraire de la représentation de la concentration des MES en fonction des débits au cours d'une crue [Bača, 2008; Lloyd *et al.*, 2016]. Dans notre approche, afin d'estimer le temps de propagation de l'onde de crue d'une station hydrométrique à l'autre ou de la source de sédiments à la zone d'accumulation, on a fait premièrement l'hypothèse du déplacement des matières en suspension à la vitesse de l'eau et ensuite on a essayé d'estimer la vitesse de l'eau, en considérant une continuité entre les sections amont et aval observées et en négligeant les effets possibles de la modification de forme des sections concernées.

Pour argumenter notre approche à l'étude de la célérité des crues dans le bassin de la rivière Jiu, on reprend synthétiquement quelques définitions. Selon le *Dictionnaire d'hydrologie de surface* (Roche, 1986), la crue ne doit plus être vue de manière simpliste comme une « *Augmentation de l'écoulement d'un cours d'eau par suite du ruissellement d'une précipitation* », mais sous l'optique de la propagation des ondes. Le *Dictionnaire de l'eau de Québec* (1981) nous enseigne que l'onde de crue a donc plusieurs autres caractéristiques, à part celles de la durée et le débit ou le volume d'eau ruisselé : une vitesse de propagation, une amplitude, une longueur d'onde, une fréquence et un taux d'amortissement.

La vogue des modèles "conceptuels" a parfois fait oublier aux hydrologues des bassins versants toutes les implications hydrauliques d'une crue réelle (certaines définitions qu'on a mentionnées dans ce sous-chapitre qui ne distingue pas la crue et de l'onde de crue en témoignent) que l'écoulement à surface libre des eaux observé dans les rivières était régi par le système d'équations différentielles non linéaires de Barré de Saint Venant (1871), comprenant une équation de conservation et une équation dynamique. Les conditions habituelles de l'application de l'hydrologie permettent souvent de reformuler en les simplifiant ces équations de l'hydraulique, en cherchant notamment à les linéariser. Il s'agit des modèles plus ou moins simplifiés qui sont mis en œuvre dans les schémas de "routage" des modèles hydrologiques [Roche, 1986]. Les hydrologues savent, au contraire, que les crues semblent se propager avec une célérité de l'ordre de grandeur de la vitesse du courant. La célérité de l'onde de crue peut être calculée à partir des équations et

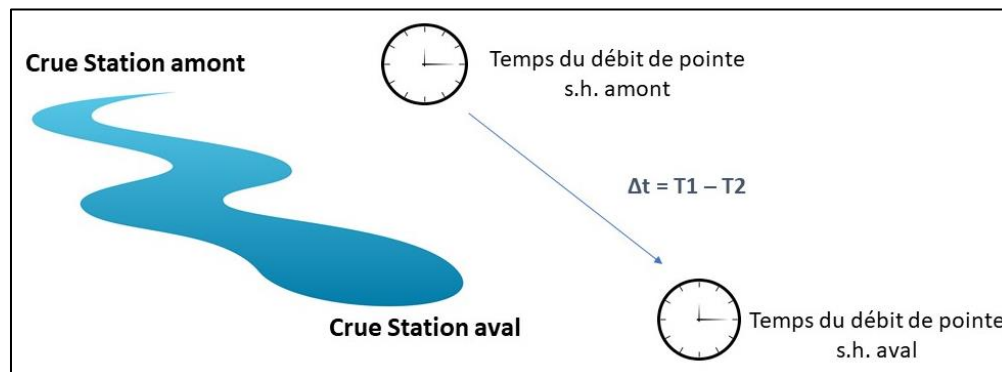
des modèles mécanistes. On peut aussi observer dans certaines conditions que, comme le disent les équations et les modèles, l'onde de crue est un peu plus rapide que la propagation d'une pollution (portée à la vitesse de l'écoulement). Ici, on va essayer de l'estimer à partir des enregistrements disponibles aux stations hydrométriques

Dans notre étude, nous n'avons pas utilisé des méthodes hydrauliques pour estimer la vitesse de propagation des crues d'une section à l'autre, mais nous avons pris en considération le temps de déplacement du débit de pointe entre deux sections et la distance entre les sections.

Pour chaque station hydrométrique pour laquelle on a disposé de crues horaires, nous avons cherché d'autres stations hydrométriques amont ou aval, sur la même rivière ou dans le même bassin, avec des données sur les mêmes crues horaires. Nous avons utilisé les séries de débits horaires en crue provenant de 20 stations hydrométriques situées sur la rivière Jiu entre Iscroni et Zăval et dans les sous-bassins de Tismana, Motru, Jił, Gilort et Breasta. Nous n'avons pas disposé d'aucune série de débits liquides horaires dans le bassin amont de la Jiu de l'Ouest, dans le bassin de la Jiu de l'Est ou de l'Amaradia.

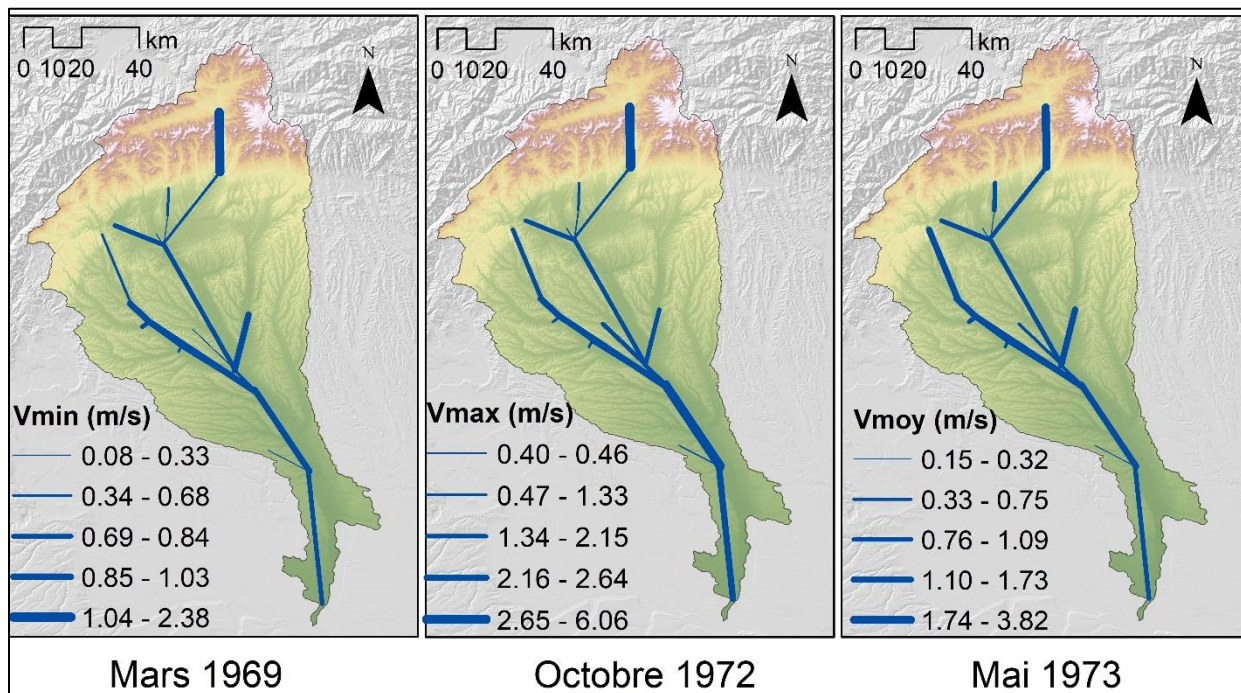
Au total, 133 crues pour lesquelles les séries de débits d'au moins deux stations amont – aval ont été disponibles ont été utilisées dans l'analyse.

La procédure proposée et adoptée a été la suivante : nous avons cherché le temps (le jour et l'heure précise) du débit de pointe à la station amont, ainsi qu'à la station aval et nous avons calculé le temps entre ces deux instants ( $\Delta t$ , h). Nous avons déduit en SIG la distance entre chaque paire de stations ( $D$ , m) et nous avons calculé ainsi une vitesse de propagation de l'onde cinématique du débit de pointe ( $v$ ,  $m \cdot s^{-1}$ ), en considérant que le pic de la crue en amont au moment «  $t$  » se déplace vers l'aval et l'on retrouve à la station en aval au moment «  $t+i$  » à un débit plus élevé (sous l'effet des apports des affluents et de la contribution de la rivière elle-même le long du secteur entre les deux stations) ou, par contre, plus atténué (sous l'effet du stockage éventuel dans la plaine alluviale ou conséquence de la rétention du volume supplémentaire dans les réservoirs). A partir de la vitesse individuelle pour chaque paire de stations amont – aval à chaque crue, nous avons calculé une vitesse maximale ( $v_{max}$ ,  $m \cdot s^{-1}$ ) et une vitesse moyenne ( $v_{moy}$ ,  $m \cdot s^{-1}$ ) de la propagation de toutes les crues étudiées sur un certain secteur (*Figure V.39*).



**Figure V.41.** Schéma de travail dans l'estimation de la vitesse de propagation des crues

La représentation spatiale des vitesses de propagation des crues a supposé la superposition des valeurs pour des secteurs inégaux, comme le montre le schéma ci-dessus. Par exemple, si on veut estimer la vitesse moyenne de propagation des crues entre les stations Filiași et Podari (avec la station hydrométrique de Răcari au milieu), nous pouvons représenter soit deux valeurs séparées ( $V_{s.h. \text{ Filiași} - \text{Răcari}}$  et  $V_{s.h. \text{ Răcari} - \text{Podari}}$ ), soit une seule vitesse directement entre Filiași et Podari ( $V_{s.h. \text{ Filiași} - \text{Podari}}$ ). Dans ce cas, les lignes de vitesse des crues ont été doublées le long des secteurs composés, avec des couleurs en gradient en fonction de la valeur. Les trois cartes qui ont résulté (**Figure V.42 a**, **V.42 b** et **V.42 c**) illustrent les vitesses minimales, maximales et moyennes de propagation des crues entre les différentes stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu à partir des résultats obtenus pour le temps de propagation (h), la longueur des secteurs (distances en km ou m entre deux stations hydrométriques) sur les différents secteurs considérés dans l'analyse (**Annexe A.10.1**). Pour représenter les différents secteurs entre les stations hydrométriques pour lesquelles nous avons disposé des débits horaires durant les mêmes crues caractérisées à l'**Annexe 9**, nous avons schématisé les longueurs de ces secteurs sous la forme des lignes droites.



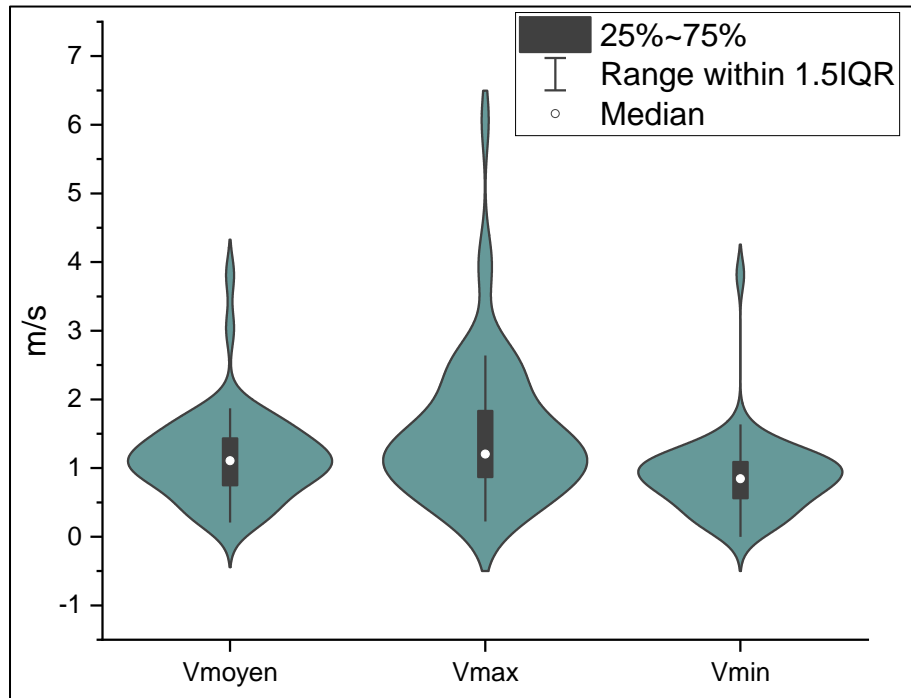
**Figure V.42.** Représentation cartographique de la vitesse des crues dans le bassin de la rivière Jiu : **a** – les vitesses moyennes de propagation des crues et **b** – les vitesses maximales de propagation des crues ; **c** – les vitesses minimales de propagation des crues (*pour chaque secteur nous avons présenté en détail le nombre de crues analysées et la variation des vitesses de propagation dans l'Annexe A.10.2*)

Nous observons aussi sur les cartes de la **Figure V.42** qu'il y a des secteurs en amont avec une propagation plus lente de la crue vers les stations situées très en aval, tandis qu'entre les stations hydrométriques du secteur moyen de la Jiu ou dans les sous-bassins de la Motru et de la Gilort, les crues se propagent plus vite. Si on essaie une estimation au niveau journalier, une crue à une certaine date arrive en

aval, à la station hydrométrique de Podari ou à l’embouchure à s.h. Zăval avec un délai de maximum 1 jour si elle a été formée dans le secteur moyen et inférieur de la Jiu ou dans les sous-bassins de la Jiłț, de la Motru ou de la Gilort, et de maximum deux jours (rarement dépassent les 48 h), si elle est formée dans le bassin de la Tismana ou en amont de s.h. Sadu, dans le secteur montagneux de la Jiu.

Les résultats trouvés sont utiles pour les prochaines analyses sur le transfert de l’eau et des sédiments pour savoir dans combien de temps une crue peut arriver d’un point à l’autre. Les durées moyennes les plus courtes ont été trouvées entre les stations Iscroni et Sadu, sur le secteur à haute pente des gorges, d’environ 3h, d’où une vitesse de  $3,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , et le temps de propagation le plus long a été entre la station Stolojani sur la rivière Runcu du bassin de la Tismana et la station Filiași sur la Jiu (avec  $\Delta t = 49 \text{ h}$  et  $v_{\text{moy}} = 0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Sur la Jiu, la vitesse maximale a atteint  $6,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans le secteur entre les s.h. Răcari et Podari. Sur les affluents de la Jiu, la vitesse maximale a été calculée pour le secteur entre les s.h. Celei sur la rivière Orlea du bassin de la Tismana et Rovinari sur la Jiu ( $v_{\text{max}} = 4,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , pour une durée de propagation de l’onde crue de seulement 9h). En moyenne, en tenant compte de toutes les crues analysées sur tous les secteurs, la vitesse de l’onde cinématique est de  $1,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tandis que la vitesse moyenne maximale est de  $1,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , avec une plage de valeurs entre  $0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $6,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (**Figure V.43**).



**Figure V.43.** La variation des vitesses (**a** - moyennes et **b** - maximales) de propagation des crues dans le bassin de la rivière Jiu

*Dans les résultats obtenus, il faut préciser une incertitude qui provient de la résolution temporelle des données utilisées. Même si on possède des séries de débits pendant les plus grandes crues au niveau de*

quelques heures, il peut ne pas être suffisamment détaillé si on veut estimer les vitesses moyennes de propagation de l'onde de crue entre les stations proches. Vu que les mesures sont faites une fois chaque 2-3 heures ou plus et que le temps minimal de propagation obtenu est de 3 h, on risque pour ces crues rapides se propageant entre des stations proches de ne pas utiliser le vrai débit de pointe qui aurait pu être entre deux mesures dont on dispose.

### 5.3. Variabilité spatio-temporelle des débits d'alluvions en suspension

L'analyse des débits solides dans un bassin versant permet de connaître la variabilité interannuelle des flux solides, durant l'année et pendant les grandes crues, quand le régime normal de l'érosion, du transport et du dépôt des sédiments est perturbé à cause de l'intensification du débit liquide et de l'érosion. Dans ce chapitre nous avons analysé la variabilité spatio-temporelle des flux solides dans le bassin de la rivière Jiu, à partir des données des débits des alluvions en suspension mesurés à 22 stations hydrométriques (conformément à la méthodologie présentée dans le chapitre §5.1.2), situées sur la rivière Jiu et ses affluents. Pour les 22 stations, nous avons également analysé les relations entre le débit liquide ( $Q$ , en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et la concentration de matières en suspension (MES, en  $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ) durant une série d'épisodes de crues dans la période 2001 – 2010. Une autre approche a porté sur les relations entre les débits solides et les variables de contrôle des bassins versant (paramètres morphométriques, lithologie). Plusieurs paramètres qui caractérisent le débit liquide et la concentration des matières en suspension ont été analysés, dans le dessein de clarifier le comportement hystérétique pendant les crues.

#### 5.3.1. La dynamique spatio-temporelle des débits des alluvions en suspension à l'échelle multi-annuelle

Sur la base des débits d'alluvions en suspension aux 22 stations hydrométriques, pour la période 2001 – 2010, nous avons déterminé: le débit moyen des alluvions en suspension multiannuel ( $R_{\text{moy}}$ , en  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), le débit maximal des alluvions en suspension ( $R_{\text{max}}$ , en  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), le pourcentage du volume annuel représenté par le volume maximal des alluvions en suspension –  $V_{\text{max}} / V_{\text{total.année}}$  (en %), la concentration moyenne des alluvions en suspension (MES, en  $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ), le volume annuel de matières solides ( $W$ , mil. tonnes) et le débit moyen spécifique des alluvions en suspension ( $r$ , en  $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ). Le **Tableau V.11** répertorie les caractéristiques principales des 22 stations hydrométriques en termes de débits des alluvions en suspension pour la période 2001 – 2010. Nous pouvons observer également la variation spatiale (amont – aval) du débit solide moyen multiannuel entre  $0,04 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  à la s.h. de Valea de Pești, sur la rivière homonyme, affluente de la Jiu de l'Ouest, et  $108,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  à la s.h. de Zăval, sur la rivière Jiu (près de l'embouchure). En termes de débit maximal multi-annuel, la tendance descendante en altitude ne se maintient pas.



**Tableau V.11.** Les paramètres caractéristiques des débits des alluvions en suspension dans les 22 stations hydrométriques analysées du bassin de la rivière Jiu (période 2001 – 2010)

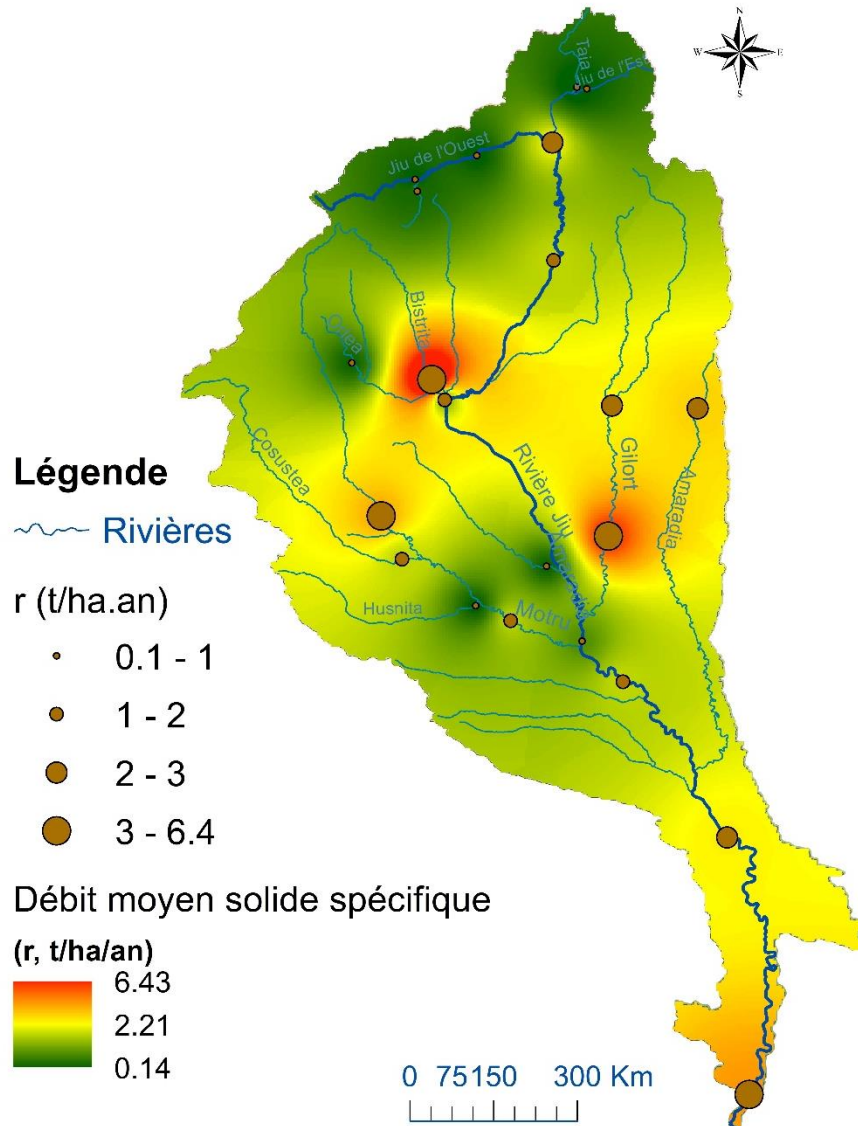
Ordre hydro	Station	Rivière	$R_{moy}$ kg·s <sup>-1</sup>	$R_{max}$ kg·s <sup>-1</sup>	$r_{moy}$ t·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup>	$r_{max}$ t·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup>	MES g·l <sup>-1</sup>
9	BĂRBĂȚENI	Jiu	0.28	23.4	0.04	25.6	5.8
14	BROȘTENI	Motru	6.73	875	3.29	428.3	847.7
16	BUSTUCHIN	Amaradia	0.29	1522	2.84	15125.5	3576.5
19	CÂMPU LUI NEAG	Jiu	0.16	19.9	0.32	39.6	46.8
20	CELEI	Orlea	0.08	355	0.39	1810.6	40.5
24	CORCOVA	Coșuștea	2.57	452	1.94	340.3	872.2
26	FAȚA MOTRULUI	Motru	10.18	1150	1.89	213.9	768.8
27	FILIAȘI	Jiu	16.83	1282	1.02	77.4	237.2
32	ISCRONI	Jiu	3.72	546	2.34	343.9	333.1
37	LONEA	Jiu De Est	0.32	5.7	0.74	13.4	157.7
38	LONEA_TAIA	Taia	0.35	136	0.13	52.1	252.7
50	PODARI	Jiu	73.56	4020	2.51	137.4	750.7
53	RĂCARI	Jiu	44.41	1095	1.95	48.0	497.5
55	ROVINARI	Jiu	13.22	3300	1.45	363.0	262.3
58	SADU	Jiu	7.66	938	1.93	236.3	309.9
63	STREHAIA	Hușnița	0.31	41.2	0.32	41.8	403.8
66	TELEȘTI	Bistrița	5.51	1640	6.45	1920.8	1200.5
67	TG. CĂRBUNEȘTI	Gilort	4.94	1372	2.48	688.7	510.6
69	TURBUREA	Gilort	14.63	6845	4.50	2107.6	1190.4
70	TURCENI	Jilț	0.45	350	0.38	294.4	406.1
73	VALEA DE PEȘTI	Valea de Pești	0.04	23.4	0.50	296.0	33.3
75	ZĂVAL	Jiu	108.61	4720	3.42	148.6	1029.7

On y voit d'autres stations hydrométriques extrêmes par rapport aux débits solides moyens multiannuels, tels que s.h. Lonea sur la Jiu de l'Est (pas la s.h. Lonea sur son affluent, Taia), avec un débit solide maximal enregistré de seulement 5,7 kg·s<sup>-1</sup> et la s.h. Turburea sur la rivière Gilort qui a les plus forts débits solides maximaux pendant les crues, atteignant 6845 kg·s<sup>-1</sup> lorsque sur la Jiu en amont de la confluence, les débits solides maximaux dans la même année, durant le même jour de la crue, sont de 4720 kg·s<sup>-1</sup> à la s.h. de Zăval.

Le rapport entre les valeurs des débits maximaux d'alluvions en suspension et les débits moyens d'alluvions en suspension ( $R_{max}/R_{moy}$ ) est, si l'on compare avec celui des débits liquides ( $Q_{max}/Q_{moy}$ ),

plus grande, avec des stations où il est supérieur à 900 (à la s.h. Bustuchin sur la rivière Amaradia). Cela montre la grande variabilité inter et intra-annuelle entre les phases de régime maximal (pendant les crues) et les périodes normales.

Nous avons spatialisé les débits solides moyens spécifiques d'alluvions en suspension ( $r, t \cdot an^{-1} \cdot ha^{-1}$ ) sur la carte de la **Figure V.44**. Le débit moyen solide spécifique se situe au-dessous de 2 tonnes / ha.an dans grande partie du bassin, des noyaux de débit fort caractérisant les bassins de Gilort et de Bistrița, avec des valeurs maximales au-dessus de 6 tonnes/ ha.an.

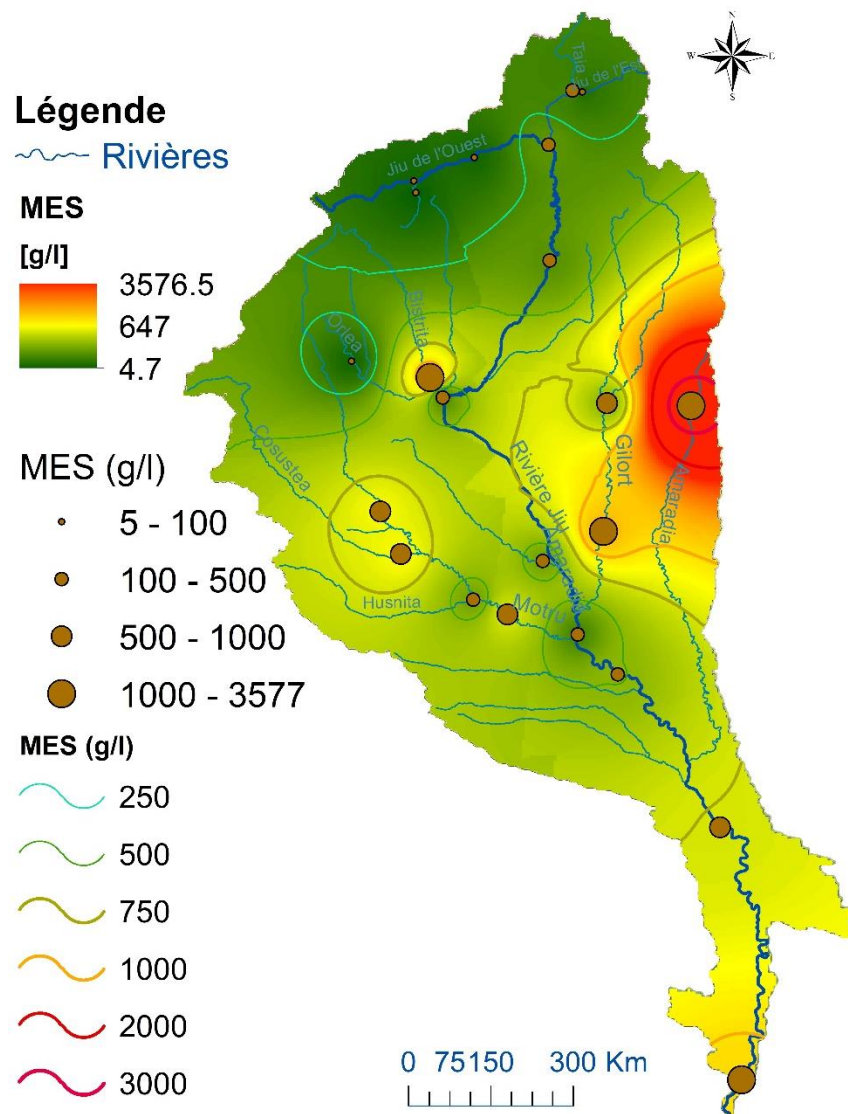


**Figure V.44.** La carte du débit moyen solide spécifique ( $r, t \cdot an^{-1} \cdot ha^{-1}$ ) dans le bassin de la rivière Jiu

Le long de la rivière Jiu, le débit moyen spécifique augmente de l'amont en aval, avec une baisse à la station de Rovinari, immédiatement en aval des réservoirs Vădeni et Târgu Jiu, qui trappent une partie des sédiments provenant de l'amont. Ainsi, la dynamique des alluvions en suspension est partiellement

diminuée ou bloquée entre le secteur montagneux et celui du piémont, marqué par un apport des affluents principaux de la Jiu, les rivières Motru et Gilort.

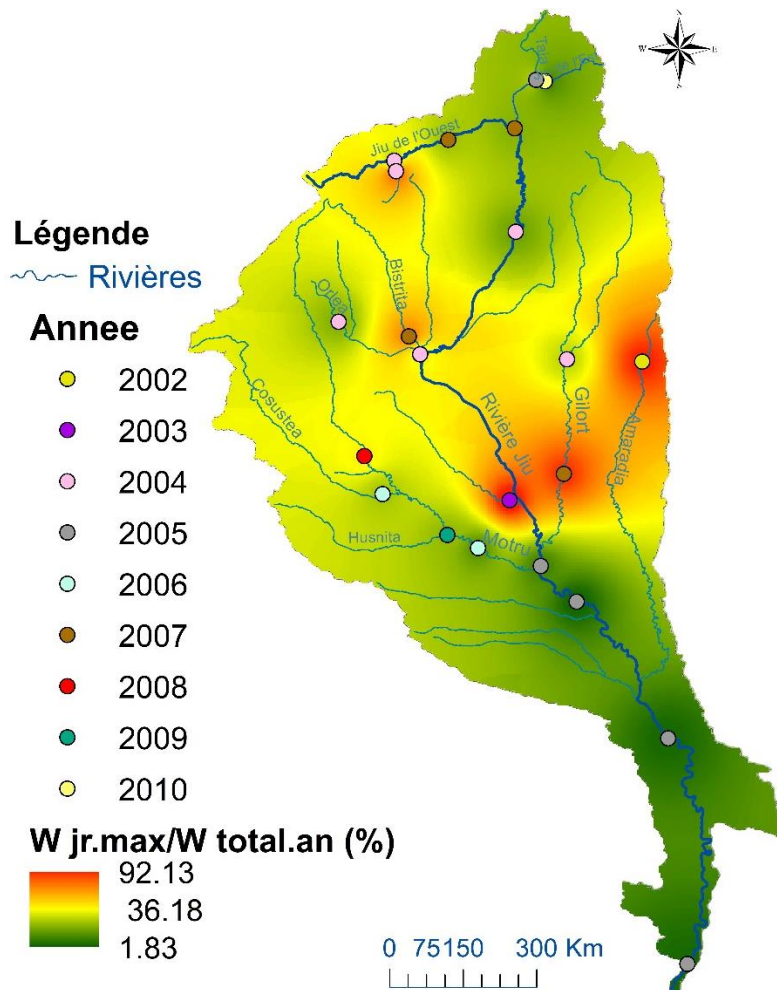
Sur la carte des matières solides en suspension (MES,  $g \cdot l^{-1}$ ) – **Figure V.45**, l'isoline de  $1000 g \cdot l^{-1}$  est interrompue, pour marquer les zones des plus grandes concentrations des alluvions en suspension autour des stations hydrométriques de Bustuchin (sur l'Amaradia), Turburea (sur la Gilort) et Zăval (sur la Jiu, à l'embouchure). L'isoline de  $750 g \cdot l^{-1}$  est plus développée dans le bassin de rivière Motru, où les stations hydrométriques de Broșteni, Fața Motrului et Corcova se remarquent avec plus de  $500 g \cdot l^{-1}$  par an et dans le bassin de la Bistrița (s.h. Telești). L'isoline de  $500 g \cdot l^{-1}$  est plus sinueuse, marquant le bassin supérieur de la rivière Jiu, pour ensuite, côté ouest vers les bassins de la Jilț et de la Motru jusqu'à la station de Răcari. L'isoline de  $250 g \cdot l^{-1}$  est toujours interrompue, avec des ramifications dans le bassin de la Jiu de l'Est et de l'Ouest, ainsi que dans le bassin de Tismana (sous-bassin de l'Orlea).



**Figure V.45.** La carte des matières solides en suspension (MES,  $g \cdot l^{-1}$ ) dans le bassin de la rivière Jiu

Le noyau autour de la station hydrométrique de Bustuchin, sur l'Amaradia est quand même singulier, marquant des valeurs des MES très élevées, supérieures à  $3000 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ . Dans cette tête de bassin, par manque de mesures complémentaires en aval, sur la rivière Amaradia (aux stations Negoiești ou Albești), nous n'avons pas assez d'éléments pour expliquer cette augmentation de la concentration des matières en suspension. Si on regarde d'où ces valeurs de MES viennent, c'est l'année 2005 qui s'impose avec les MES annuels d'environ  $16000 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$  qui se remarque. L'année 2005 a été, en effet, caractérisée par la plus étendue période de crues, qui ont probablement beaucoup transporté en termes de matières solides, mais nous ne pouvons pas complètement expliquer cette augmentation à la station de Bustuchin seulement à la base de cet argument. Nous n'excluons pas une erreur de mesure ou de transcription des données dans la fiche de débits des alluvions en suspension.

Pour chaque station hydrométrique nous avons estimé la contribution (%) du jour avec le volume maximal au volume total de l'année (**Figure V.46**), afin d'estimer la contribution du jour de maximum annuel à l'export total des matières en suspension aux stations hydrométriques.



**Figure V.46.** La variation du taux de contribution ( $W_{jr.max}$  [%]) de la quantité de matières solides dans le jour de maximum par rapport au volume total de matières solides de l'année ( $W_{total.an}$  [%])

Les années qui ont fourni la contribution maximale du volume des alluvions en suspension journalier par rapport au volume annuel ont été 2004, 2005 et 2007. Il y a un regroupement des stations autour des années de la contribution maximale, le long de la Jiu (secteur de piémont et de plaine) il s'agit des crues de l'été 2005, sur la Jiu dans le secteur supérieur les crues d'octobre – novembre 2007 ont fourni la contribution maximale journalière, tandis que le bassin de la Motru a contribué le plus en 2006. L'année 2004 est présente partout dans le secteur moyen et supérieur, tant sur la Gilort, sur la Jiu et dans le bassin de la Tismana. En ce qui concerne les pourcentages, on remarque les suivantes :

- Durant les années avec des crues ayant beaucoup transporté de matières solides, la contribution d'un seul jour (où le maximum du débit des alluvions en suspension s'est produit) au volume total de l'année peut atteindre 86% (à la s.h. Turburea sur la Gilort, caractérisée par une forte turbulence) et s.h. Turceni (sur la rivière Jilț), tandis que sur la rivière Jiu, la contribution atteint maximum 39% à s.h. Rovinari, pour des débits d'alluvions en suspension maximaux similaires à la Gilort. La différence est donnée par la variabilité intra-annuelle des débits d'alluvions en suspension, qui est plus homogène sur la Jiu et plus accentuée sur la Gilort durant les crues.

- Sur les affluents, dans leurs secteurs supérieurs, la contribution au volume solide annuel du jour avec le débit des alluvions en suspension maximal varie entre des limites assez larges, entre 5% et 47% à la s.h. Celei sur la rivière Orlea et entre 2% et 85% à la s.h. Bustuchin sur la rivière Amaradia.

- Durant les années avec les plus grandes crues (2004, 2005, 2006, 2007), les jours de débit maximum solide ont contribué au volume total des alluvions en suspension durant l'année avec des taux qui ont varié de 20% à plus de 80%, le transfert de la matière sédimentaire étant fortement dépendants de ces événements extrêmes.

- Les coefficients les plus élevés correspondent aux stations hydrométriques situées dans les secteurs supérieurs des rivières, possiblement parce que là, une crue annuelle qui contribue beaucoup en alluvions transportées peut représenter la seule période de forte production d'alluvions.

L'importance du jour de maximum annuel des débits d'alluvions en suspension par rapport à la quantité totale de l'année est beaucoup plus grande que lorsqu'on évalue les volumes liquides. Ce fait est dû à la variabilité plus grande dans une série de débits solides par rapport aux débits liquides.

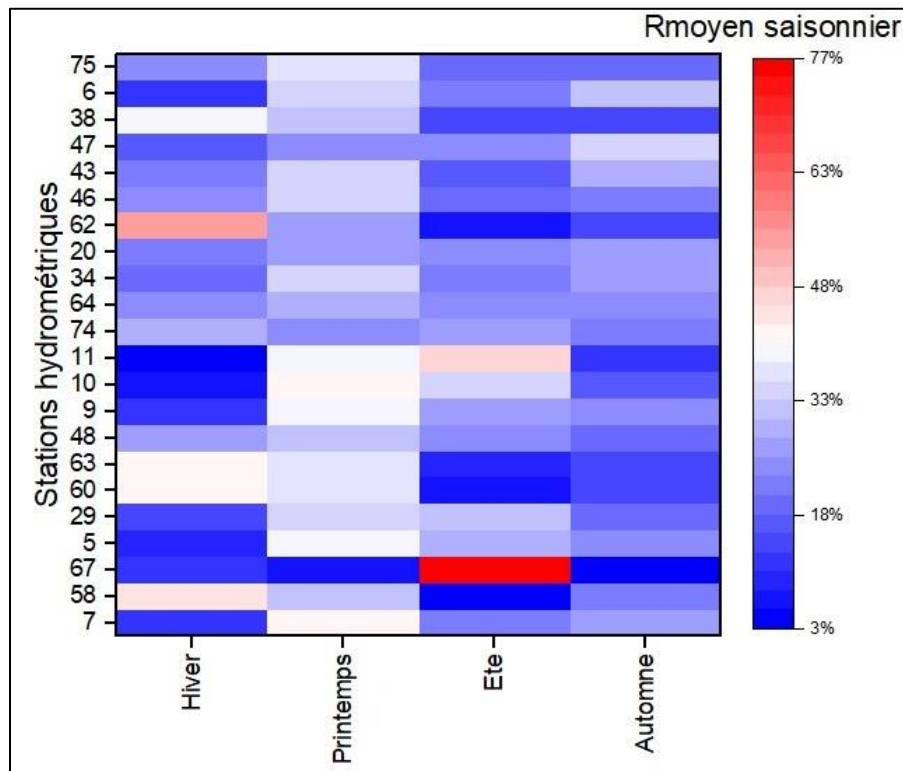
### **5.3.2. La dynamique spatio-temporelle des débits des alluvions en suspension à l'échelle mensuelle et saisonnière**

En ce qui concerne la répartition mensuelle des volumes des alluvions en suspension produits, ce sont les mêmes mois que l'on a trouvé comme les plus contributifs pour les volumes liquides. La répartition saisonnière des quantités moyennes d'alluvions en suspension est plus équilibrée (*Figure V.47*), avec le



printemps qui détient le taux le plus élevé (environ 32%), comme dans le cas des débits liquides, mais avec des contributions presque égales des autres saisons aussi (environ 23%).

En général, le mois où le maximum de matières en suspension est transporté, est le mois d'avril (environ 13,8%), suivi par le mois de mars (11,1%). Le mois de novembre se situe en haut du classement, contribuant avec 10,8% de la quantité annuelle d'alluvions. Le mois de septembre, le volume moyen d'alluvions en suspension représente seulement 3,86% du total annuel. Aux stations hydrométriques situées soit dans le secteur montagneux et dans le piémont, le maximum est enregistré en été (juillet dans le cas de la s.h. de Lonea sur la rivière Taia) et en février (à la s.h. de Strehaia sur la rivière Hușnița).



**Figure V.47.** La variation saisonnière des quantités d'alluvions en suspension par rapport au volume total de matières solides de l'année dans le bassin de la rivière Jiu (2001 – 2010)

A l'échelle annuelle, le bassin de la rivière Jiu à la station de Zăval, contribue avec environ 20% des quantités des alluvions en suspension enregistrées à la station hydrométrique de Corabia sur le Danube (selon les rapports de l'INHGA), ce qui démontre l'importance de la rivière Jiu dans l'alimentation en matières en suspension du Danube inférieur.

### 5.3.3. L'importance de l'industrie du charbon dans la production des alluvions en suspension

L'effet sur la quantité et la qualité des alluvions en suspension transportées en aval des bassins miniers a été signalé en différentes reprises dans des études en domaine. Nous reprenons ici quelques

conclusions où les groupes de chercheurs qui se sont appuyés sur la problématique de l'origine des alluvions de la rivière Jiu sont arrivés :

- La granulométrie des sédiments en suspension en aval du secteur montagneux de la rivière Jiu est trop fine, alors que la taille des sources naturelles est plus grossière. Il s'agit probablement d'un enrichissement en charbon [Rădoane, 2016] ;

- Le degré de colmatage des réservoirs Vădeni et Târgu Jiu avec des boues de charbon [Rădoane et Rădoane, 2005] a été analysé aussi par d'autres collectifs d'auteurs, qui ont constaté que « *l'eau de la rivière Jiu chargée de suspensions de charbon: 51 à 115 mg/l en 2004 en amont des réservoirs Vădeni et Târgu Jiu et de 32 à 41 mg / l dans les sections en aval de la ville de Târgu Jiu* » [Cârțină et Căpățină, 2007] ;

- Tous ces effets sont probablement dus au fait que « *dans la vallée de la Jiu, la majeure partie du charbon est lavée afin de réduire la teneur en cendres des minéraux stériles, principalement de la matière argileuse* » [Ionică et al., 2002]. Cette relation entre les activités minières et la mise en suspension (par lavage ou même par processus géomorphologiques sur les pentes des tas de stérile) des grosses quantités d'alluvions en suspension (rendent la Jiu très turbide) a été aussi un point de débat dans les études de Savin également [Savin, 2006].

- Dans ces conditions, il est souvent le cas d'un manque de conformité entre le débit liquide et sa capacité de transport de la matière en suspension, d'un côté, et les vraies quantités d'alluvions en suspensions apportées par certaines rivières dans des secteurs clé entre les zones minières et l'aval. Ainsi, plusieurs situations de transport solide à haute quantité dans des périodes de débits liquides pas très forts ont été observées. Une de ces situations a été la période sept. – déc. 1991, quand la Jiu dans le secteur aval de la Dépression Petroșani transportait en suspension en moyenne 0,6 kg/s, alors que durant toute l'année 1992 (quand l'activité minière a repris le rythme), la rivière a gardé un débit des alluvions en suspension ~172 kg/s, indépendamment des variations du débit liquide [Rădoane, 2016]. A partir des observations, mesures et estimation des débits liquides et solides mensuels pendant les années 1991 et 1992, nous avons aussi été capables de confirmer cette variabilité annuelle des débits d'alluvions en suspension indépendamment de celui des débits liquides. Pour cette démonstration, nous avons ainsi utilisé les séries de débits mensuels liquides et solides à la station hydrométrique d'Iscroni (immédiatement en aval du bassin de houille de Petroșani, coté Jiu de l'Ouest), pour illustrer la grande quantité d'alluvions en suspension transportées pendant l'hiver (quand le débit liquide est minimum, mais quand probablement l'activité minière s'est intensifiée), et les stations hydrométriques de Rovinari et Filiași, pour illustrer la situation « normale » de la relation débits liquides – débits solides, en aval de l'influence de la zone minière (et aussi en aval des réservoirs Vădeni et Târgu Jiu, qui stockent une partie de ces sédiments) – **Figure V.48**.

Autres exemples de relations « anthropiques », dépendantes de l'activité minière, entre les débits liquides et les débits des alluvions en suspension sont à trouver dans *l'Annexe 11*.

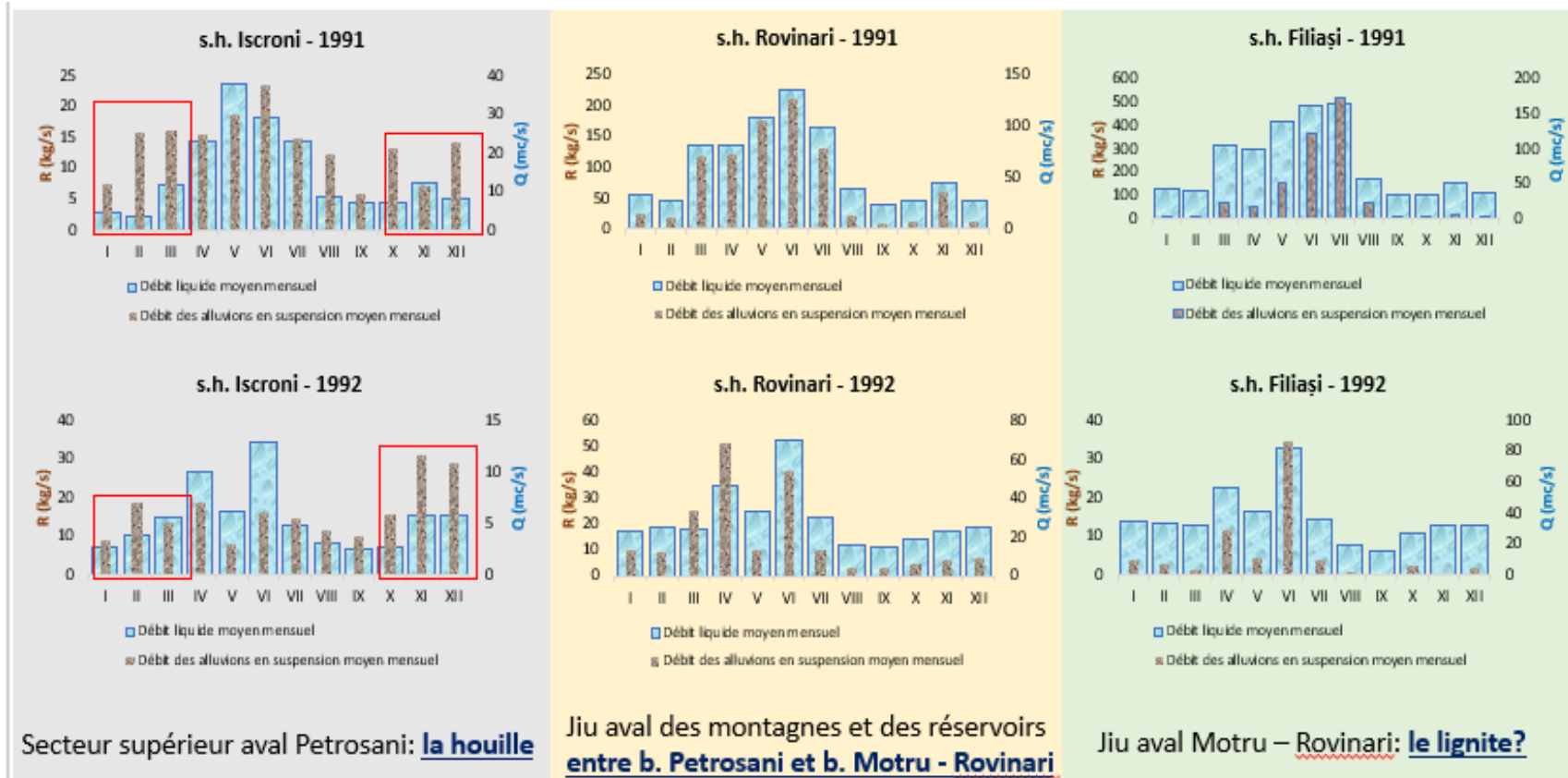
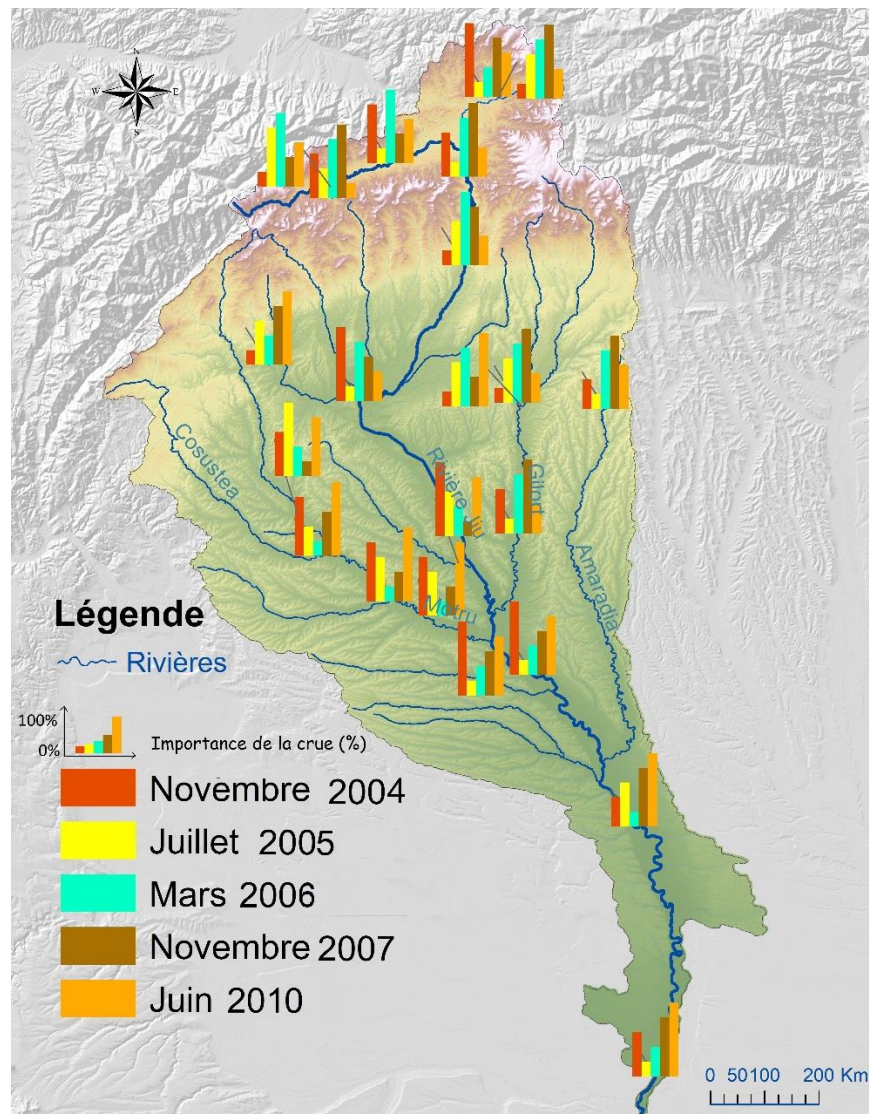


Figure V.48. Les années 1991 – 1992. Une relation débit liquide (Q) – débit des alluvions en suspensions (R) gouvernée par les activités minières en amont

### 5.3.4. Les débits des alluvions en suspension pendant les crues

Le flux des sédiments en suspension pendant les crues fortes est un sujet qui, depuis quelques années, est devenu de plus en plus important dans l'hydrologie, particulièrement dans les bassins versants larges sous l'influence des activités de l'homme ou dans le cas les bassins non-homogènes [Lloyd *et al.*, 2015]. Des études sur la mobilisation de particules lors des crues pourraient être utiles pour mieux comprendre les processus géomorphologiques à l'échelle du bassin et trouver les sources alluviales [Dumitriu, 2017].

Dans ce sous-chapitre, nous avons caractérisé les événements de crues du point de vue des quantités de matières en suspension mobilisées. Pour ce faire, nous avons étudié 5 des plus grandes crues de la période 2001 – 2010, en analysant la quantité de matières en suspension disponibles avant, pendant et après les crues ( $R$ , tonnes). Nous avons choisi les crues suivantes : novembre 2004 ; juillet 2005 ; mars 2006 ; novembre 2007 et juin 2010. Nous avons considéré comme 100% la crue principale pour chaque station, selon la quantité totale d'alluvions fournies et en fonction de celle-ci, nous avons exprimé les quantités d'alluvions durant les périodes des autres crues comme pourcentage de la crue principale. L'importance des 5 crues pour les 22 stations est illustrée dans la **Figure V.49**.

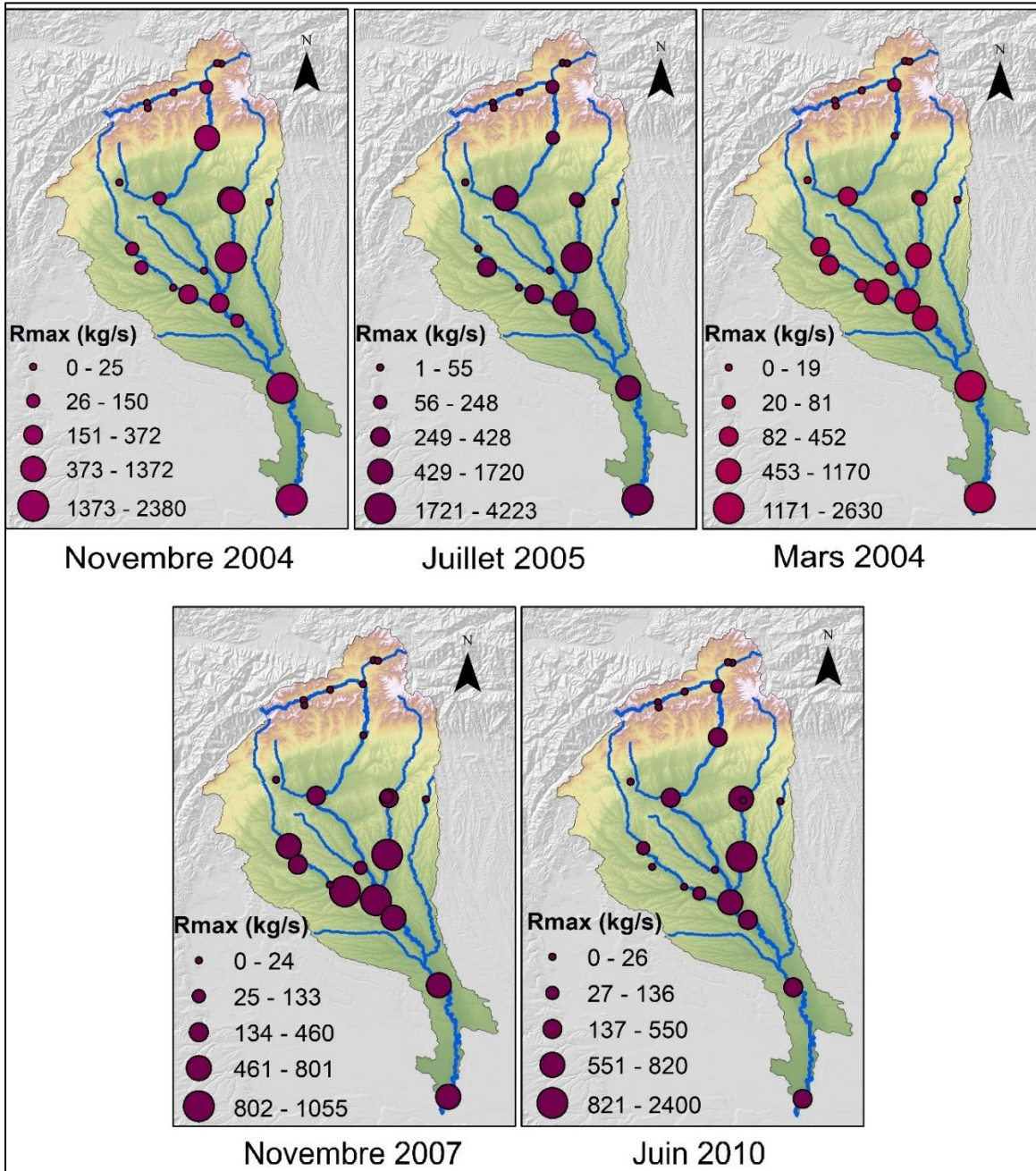


**Figure V.49.** La hiérarchisation des 5 crues étudiées selon leurs apports en alluvions aux 22 stations hydrométriques

Ensuite, nous avons spatialisé les 5 crues en fonction du débit des alluvions en suspension maximal produit ( $R_{\text{max-crue}}$ ,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) à chaque station (**Figure V.50**). La crue de juillet 2005 a été la plus importante en termes de quantité de matières en suspension transportées, surtout aux stations hydrométriques du secteur



moyen et inférieur du bassin de la rivière Jiu. Les quantités maximales d'alluvions en suspensions de la rivière Gilort ont dépassé ceux transités par la rivière Jiu, probablement à cause de l'existence d'une source locale d'alluvions, qui ont été mobilisées en amont de la station de Turburea et ont été ensuite stockées dans la plaine inondable avant la confluence avec la rivière Jiu.



**Figure V.50.** La spatialisation des crues analysées aux 22 stations hydrométriques, en fonction du débit des alluvions en suspension maximal produit ( $R_{max-crue}$ ,  $kg \cdot s^{-1}$ )

Nous avons aussi calculé l'indice d'efficacité de l'événement de crue, l'*IEE*, qui donne des informations sur les quantités d'alluvions disponibles avant l'apparition d'un événement hydrologique et



constitue plutôt un indicateur de l'effet de l'activité anthropique, étant utilisé avec succès dans différentes études [Vanmaercke *et al.* 2010 ; Obreja, 2012]. Ce paramètre est calculé en divisant le débit liquide ( $Q$ ,  $m^3s^{-1}$ ) par la concentration en alluvions (MES,  $g \cdot l^{-1}$ ), divisée par 1000.

$$IEE = \frac{1000Q}{MES}$$

L'utilisation de ce paramètre est recommandée lorsqu'il s'agit des rivières dont l'écoulement est influencé par des activités anthropiques, comme les réservoirs qui atténuent le débit liquide de pointe et stockent une partie considérable des alluvions derrière les barrages. Les stations hydrométriques choisies pour cette étude ont été celles situées sur la rivière Jiu (s.h. Isroni, s.h. Sadu, s.h. Rovinari, s.h. Filiași, s.h. Podari) pour lesquelles nous avons disposé à la fois des débits liquides mesurés (donc affectés par l'activité anthropique) et reconstitués (sur la base des débits des divers usages économiques). Afin de prendre en compte la période d'avant et après la crue, nous avons considéré les débits du mois entier. Nous avons analysé les 10 crues les plus importantes dans la période 2001 – 2010. Ces crues se sont produites pendant les mois de mars à août et en octobre – novembre (**Tableau V.12**). Elles ont été choisies en fonction du débit des alluvions en suspension à la station hydrométrique de Zăval, qui est la plus proche de l'embouchure et en amont de laquelle nous pouvons analyser les différents apports en matières en suspension provenant de la Jiu en amont ou des affluents.

**Tableau V.12.** Caractéristiques générales des 10 plus grandes crues aux stations hydrométriques de la rivière Jiu dans la période 2001 – 2010

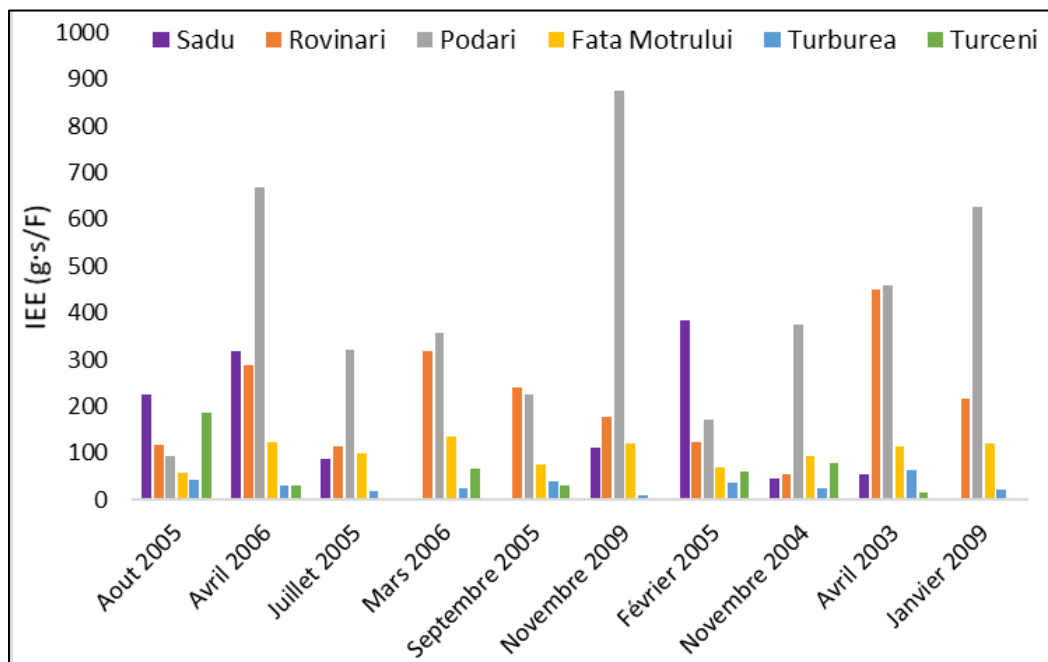
No.	Crue	s.h. $R_{max}$ (kg/s) sur les affluents			s.h. $R_{max}$ (kg/s) sur la Jiu aval			s.h. $R_{max}$ (kg/s) du bassin amont s.h. Zăval	
		s.h.	R	Relation amont – aval	Podari	Relation amont - aval	Zăval	Station	Rmax
1	Aout 2005	Turburea	378	↓	8230	↑↓↔	4560	Podari	8230
2	Avril 2006	Turburea	1480	↔	1028	↓	3438	Turburea	1480
3	Juillet 2005	Turburea	2340	↔	1748	↓	3021	Turburea	2340
4	Mars 2006	Fața Motrului	950	↓	2928	↔↓	2713	Podari	2928
5	Septembre 2005	Turburea	103	↓	817	↓	2220	Podari	817
6	Novembre 2009	Turburea	1220	↔	631	↓	1285	Turburea	1220
7	Février 2005	Telești	277	↓	1281	↓	1270	Podari	1281
8	Novembre 2004	Tg Cărbunești	608	↓	1859	↑↔	1263	Rovinari	3614
9	Avril 2003	Fața Motrului	343	↓	1107	↓	1117	Podari	1107
10	Janvier 2009	Broșteni	473	↓	1057	↓	1059	Filiași	1132

Entre les stations hydrométriques des affluents et s.h. Podari, sur la Jiu, ainsi qu'entre cette dernière station et s.h. Zăval à l'embouchure, nous avons établi des possibles processus capables d'expliquer les différences de quantité d'alluvions en suspension, en employant différents symboles :

- ≡ ↓ - une contribution mineure/ moyenne vers l'aval ;
- ≡ ↓↓ - une contribution majeure vers l'aval ;
- ≡ ↔ - stockage intermédiaire d'une grande partie des sédiments transitant la station amont ;
- ≡ ↔ - stockage intermédiaire mineur des sédiments transitant la station amont ;
- ≡ ↑↓ - une contribution vers l'aval d'une certaine quantité de sédiments en suspension provenant d'un secteur/ sous-bassin amont plus éloigné de la station en cause.

Dans certains des cas, le débit d'alluvions en suspension est plus petit en aval qu'en amont (si l'on compare aux stations hydrométriques de Zăval, Podari ou même plus en amont, à Răcari, Filiași et Rovinari), car il y a des fois des stockages intermédiaires et des sources locales de sédiments en suspension qui n'influencent pas le débit plus en aval.

La **Figure V.51** indique une croissance de l'efficacité de transport des alluvions en suspension pendant les crues dans les mois d'été, par rapport aux autres crues produites en automne ou en printemps. Ce résultat est en accord avec les précisions dans la littérature, conformément auxquelles en été, le transport des plus grandes quantités d'alluvions au cours d'une année a lieu en raison de la production de grandes eaux [Diaconu, 1971; Mustățea, 2005].



**Figure V.51.** L'évolution comparée du paramètre IEE durant les 10 plus grandes crues (par rapport à la station de l'embouchure, de Zăval), aux stations hydrométriques de la rivière Jiu (2001 – 2010)

Nous avons illustré l'indice IEE suivant une logique amont – aval, de la façon suivante :

✓ Pour le secteur supérieur de la rivière Jiu, nous avons choisi la station hydrométrique de Sadu, afin d'observer si les activités anthropiques d'extraction et lavage du charbon sont aussi intenses que les processus naturels de versant et de berge pour la mobilisation des sédiments pendant les crues ;

✓ Pour le secteur moyen de la rivière Jiu, c'était la station hydrométrique de Rovinari (qui capture les sédiments provenus tant de la Jiu montane et du bassin versant de la Tismana, étant également relevant pour la comparaison avec les quantités d'alluvions de s.h. Sadu entrant dans les réservoirs de Vădeni et Târgu Jiu, situés juste en amont de Rovinari ;

✓ Pour le secteur inférieur de la rivière Jiu, nous avons choisi la station hydrométrique de Podari ;

✓ Parmi les affluents, nous avons privilégié les stations hydrographiques de Fața Motrului et de Turburea, qui se trouvent le plus en aval des sous-bassins principaux de la rivière Jiu, celui de la Motru et de la Gilort et la station de Turceni, sur la Jilț, en aval des champs d'exploitation du lignite du bassin minier Motru – Rovinari.

La contribution des résultats du paramètre IEE à l'analyse générale de la dynamique hydro-sédimentaire est en conclusion évidente dans le contexte de la connaissance de la capacité à mobiliser et à transporter les sédiments de certaines crues. La variation de l'indice d'efficacité de la crue (IEE) est en mesure d'expliquer les relations amont – aval dans le contexte du continuum du transport des alluvions, ou par contre, de leur stockage intermédiaire.

Nous observons que les stations où des quantités immenses d'alluvions arrivent (s.h. Turburea est le meilleur exemple), en aval sur la Jiu, à Podari, une moindre quantité de sédiments sont transités, alors que la question se posait autour des processus de mobilisation et des endroits du stockage entre Turburea, la confluence entre la Gilort et la Jiu et la station de Podari. L'explication peut être donnée par les résultats de l'IEE qui montrent qu'en fait la rivière Gilort a une capacité de transport assez faible et, par conséquent, les alluvions qu'on observe à s.h. Turburea (provenues probablement des sources pas très lointaines, de la berge ou de la remobilisation du matériel du lit), ne sont transportés toutes en aval, jusqu'à la rivière Jiu. Le contre-exemple peut être la rivière Jiu en amont (les stations Sadu et Rovinari), caractérisées par des valeurs de l'IEE supérieures à 100 en général, probablement grâce à leur capacité plus élevée de transport et de mobilisation des sédiments (à Sadu on peut aussi ajouter l'effet de la pente).

### **5.3.5. L'hystérésis à l'échelle journalière entre le débit liquide et la concentration des alluvions en suspension**

#### ***5.3.5.1. L'hystérésis en hydrologie, quelle implication dans le transport des sédiments ?***

Lors des crues, la concentration des alluvions en suspension (MES) et les débits liquides (Q) peuvent souvent être retrouvés dans une relation hystérétique, un phénomène irréversible se produisant lors

de la propagation de l'onde de crue qui consiste en un passage non concomitant de l'eau et de la matière sédimentaire [O'Kane, 2005]. Les mesures des débits et les inférences statistiques sur le comportement des sédiments en suspension pendant les crues ont montré que les deux variables hydrologiques (Q et MES) s'alignent rarement le long d'une ligne de régression unique, mais ils suivent le plus souvent des relations en boucle [Ashmore et Day, 1988; Chen *et al.*, 2016].

La quantification de la synchronicité entre les sédiments fins et le débit liquide pendant les crues nous permet non seulement de comparer les sous-bassins, mais aussi d'illustrer le rôle de la connexion entre la concentration des matières en suspension et l'écoulement de l'eau dans l'étude des sources des sédiments au niveau d'un bassin versant [Lawler *et al.*, 2006].

Notre intérêt de capturer le caractère hystérétique d'une crue fait partie d'une démarche d'analyse probabiliste des événements hydrologiques extrêmes, afin de mieux comprendre les processus internes du système hydro-sédimentaire [Fovet *et al.*, 2015 ; Lloyd *et al.*, 2016].

L'analyse de l'hystérésis peut aider à connaître les mécanismes hydro-sédimentaires qui se produisent pendant les crues [Chen *et al.*, 2016; O'Kane, 2005]. L'hystérésis est actuellement reconnue comme le nom collectif sous lequel on désigne le comportement hydro-sédimentaire non-linéaire et complexe durant les crues [Fovet *et al.*, 2015]. Le modèle le plus simple d'une boucle d'hystérésis s'appelle généralement « *hysteron* » et est marqué par l'absence de la linéarité et le fait qu'il n'obéit pas la superposition des débits solides et liquides [O'Kane, 2005].

Généralement on suppose que l'hystérésis dans le sens horaire, généré par l'augmentation plus rapide de la concentration des MES par rapport au débit pendant partie montante de l'hydrogramme de la crue, suggère l'existence d'une source sédimentaire près de la station hydrométrique [Dumitriu, 2017]. Au contraire, l'hystérésis antihoraire signifie en général un décalage plus grand entre le débit et la concentration maximale des MES, ce qui indique une source de sédiments située plus loin en amont [Bača, 2008; Lloyd *et al.*, 2016]. Ces deux situations sont les plus faciles à interpréter, mais les classifications de comportement hystérétiques suggèrent l'existence d'au moins 5 types d'hystérésis [Williams, 1989]. (i) dans le sens horaire ; (ii) dans le sens antihoraire ; (iii) ligne à valeur unique; (iv) le chiffre huit; (v) type complexe.

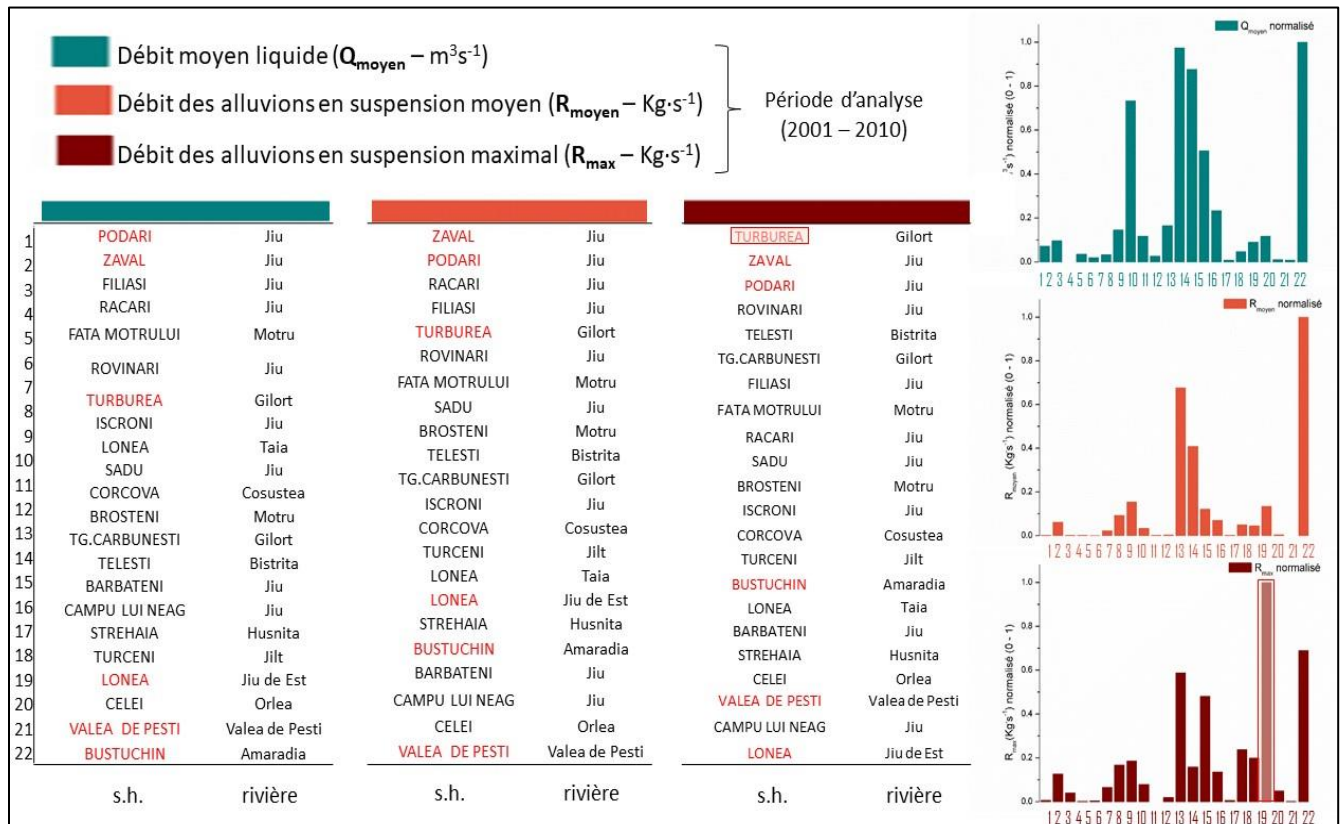
L'approche scientifique que nous poursuivons dans ce chapitre partage l'intérêt des deux sciences : l'hydrologie (en termes de relation entre les deux paramètres principaux mesurés aux stations hydrométriques - les débits liquides et solides) et la géomorphologie (du point de vue du comportement des sources alluviales lors d'inondations de faible période de retour, via le rôle de certains facteurs morphométriques, dynamiques et même anthropiques dans la production de sédiments en suspension). Le problème de la structure hystérétique des sources alluviales ouvre une nouvelle voie de recherche au carrefour de la géomorphologie et de l'hydrologie fluviales, soulignant l'attention portée à la causalité des relations entre l'écoulement liquide et la concentration de sédiments en suspension, comme le montrent

divers problèmes majeurs, tels que comme la connectivité des sources alluviales avec les lits des rivières, ou les changements dans les lits des rivières et les facteurs de contrôle menant à ces transformations [Dumitriu, 2017; Moroşanu *et al.*, 2018].

Etant donnée qu’une grande proportion des sédiments fins est mobilisée durant les crues [Savin, 2008], dans ce chapitre nous essayons de mieux comprendre la relation entre la dynamique du débit liquide et du transport des sédiments fins pendant des événements de crue à travers l’application de l’indice d’hystérésis.

### 5.3.5.2. Approche méthodologique

L’analyse est basée sur les séries des débits liquides (Q) et des concentrations d’alluvions en suspension (MES) à pas de temps journalier des 10 plus grandes crues de la période 2001 – 2010 (sur la base du débit liquide maximal déjà la station hydrométrique Podari sur la Jiu), pour les 22 stations pour lesquelles ont disposé des séries de débits solides. Nous observons dans la **Figure V.52** la différence d’apport en matières liquides et solides des certaines stations hydrométriques, l’exemple de la rivière Gilort à la station Turburea (qui est sur la première place à l’export des alluvions en termes de  $R_{max}$ ) étant éloquent.



**Figure V.52.** La classification des 22 stations hydrométriques selon les débits liquides et des alluvions en suspension (moyens et maximaux) multiannuels (afin de montrer tout l’écart des valeurs, celles-ci ont été normalisées)



Une place différente est occupée aussi par la rivière Amaradia, à s.h. Bustuchin qui, étant dans la tête du bassin, présente le plus bas débit liquide parmi les 22 stations analysées, tandis que les quantités moyennes et maximales multiannuelles d'alluvions en suspension sont légèrement grandes par rapport à sa capacité de transporter et à la taille du bassin amont.

Ces situations sont probablement explicables si on prend en considération les différents apports de la matière solide et la mise en action des sources d'alluvions très proches de la rivière, voire du lit mineur ou majeur, qui mènent à une augmentation locale des quantités de sédiments mobilisés. Une analyse de l'effet d'hystérésis entre le débit liquide et solide pourrait être en mesure de mettre en évidence les différents types de sources (plus éloignées ou plus proches du lit) des sédiments fins. Pour ce faire, les événements de crue sont les moments de l'année quand la plupart de la matière solide est exportée et l'analyse de la relation entre le débit liquide et solide à un pas de temps plus petit (échelle journalière) est recommandée pour ce genre d'approche.

Les données journalières présentent le désavantage d'avoir une résolution temporaire assez faible, ce qui peut être considéré comme un inconvénient dans la connaissance détaillée des processus de transport sédimentaire.

Un indice simplifié de l'hystérésis a été calculé pour le débit médian ( $Q_{\text{méd}}$ , défini comme le  $Q$  à 50% de la plage de valeurs du débit), selon la méthode standard de [Lawler et al. \(2006\)](#):

$$Q_{\text{méd}} = k \cdot (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}) + Q_{\text{min}}$$

Dans la formule générale de l'hystérésis,  $Q_{\text{max}}$  représente le maximum/le pic du débit de la crue, le  $Q_{\text{min}}$  est le point de début de l'événement et le  $k$  est fixé à 0.5 et représente la position pour laquelle on investigate la largeur de la boucle (le point médian du bras du graphique).

Les valeurs des MES relatives au  $Q_{\text{méd}}$  sur la rame montante de la crue ( $\text{MES}_{\text{mont}}$ ) et la partie descendante ( $\text{MES}_{\text{desc}}$ ) de l'hydrogramme de la crue sont puis interpolées pour le  $\text{MES}_{\text{mid}}$  ont été calculées avec un code que nous avons adopté dans le logiciel R, à la base des formules suivantes :

- Si  $\text{MES}_{\text{mont}} > \text{MES}_{\text{FL}}$ , la crue est caractérisée par une hystérésis dans le sens horaire et on applique la formule suivante :  $\text{HI}_{\text{méd}} = (\text{MES}_{\text{mont}}/\text{MES}_{\text{desc}}) - 1$ .
- Au contraire, si  $\text{MES}_{\text{mont}} < \text{MES}_{\text{FL}}$  et l'hystérésis est antihoraire, l'indice est obtenu comme il suit :  $\text{HI}_{\text{méd}} = (-1/(\text{MES}_{\text{mont}}/\text{MES}_{\text{FL}})) + 1$ .

### 5.3.5.3. Résultats de l'analyse d'hystérésis

Les valeurs résultantes de  $\text{HI}_{\text{mid}}$  pour les 10 crues analysées sont résumées dans le **Tableau V.13**. La simple connaissance des valeurs de l'indice HI n'est pas suffisante pour encadrer la relation entre le débit liquide et le débit solide dans un des types hystérétiques possibles.

**Tableau V.13.** L'indice d'hystérésis (HI) obtenu pour les 10 plus grandes crues de la période d'analyse 2001 – 2010

Ordre hydro	Station hydrométrique	Mar-06	Nov-07	Aug-05	Nov-04	Apr-06	Jan-09	Oct-07	Jul-05	Nov-09	Apr-03
7	Bărbățeni		0.002		0.0001		-0.011	0.607	-0.036	0.56	-0.23
58	Broșteni	-0.05	-0.014	-0.191	0.109	-0.154	-0.037	0.017	-0.030	-0.02	0.08
67	Bustuchin	0.53		-0.092	-0.089		-0.131		-0.082		0.28
5	Câmpu lui Neag		-0.07	-0.066	0.372	0.208		0.070	-0.325	-0.03	-0.06
29	Celei	-0.13	-0.081	-0.068	0.047				-0.026	-0.04	0.19
60	Corcova		-0.200		0.013	-0.229	-0.048		-0.229	-0.06	0.31
63	Fața Motrului	0.008	0.031	0.138	0.034	0.046	-0.012		-0.200	-0.01	0.04
48	Filiași	-0.01		0.062	0.016	0.045	-0.215		-0.032	-0.01	0.09
9	Iscroni		0.135	-0.311	-0.289	-0.212	0.749	0.136	-0.263	0.534	-0.12
10	Lonea	-0.01	0.097	0.517	0.170	0.086			0.001		
11	Lonea Taia	-0.48						0.560	0.020		
74	Podari	0.659	0.744	-0.018	0.394	0.207	0.585	0.192	0.500	0.897	0.15
64	Răcari	0.801	0.205	-0.463	0.690	-0.038	0.662	0.522	0.074	0.553	0.34
34	Rovinari	0.008	-0.046	0.056	0.084	0.001	0.006	-0.01	-0.003	0.002	0.016
20	Sadu		0.371	0.037	0.140	0.530	0.444	0.166	0.260	-0.17	0.29
62	Strehaia	0.536	0.412	-0.193		-0.358	-0.018	-0.06	0.310		-0.32
46	Telești	-0.19	0.232	-0.072	-0.028	0.203	0.256		-0.12	-0.02	-0.29
43	Târgu Cărbunești	-0.03	-0.050	-0.085	-0.154	0.335	0.168	-0.11	0.29	0.417	0.26
47	Turburea	0.024	0.027	0.075	0.766	0.003	0.773	-0.20	0.017	0.019	0.26
38	Turceni	0.162	-0.555	-0.062	0.232	-0.338					-0.05
6	Valea de Pești		-0.107	0.089	-0.249		0.29	-0.79	-0.01	-0.01	-0.01
75	Zăval	0.176	0.484	0.111	0.120	0.128	0.468	0.484	-0.159	0.748	0.311

Afin de caractériser le type d'hystérésis de chaque crue à chaque station, nous avons analysé toutes les boucles d'hystérésis, afin de classifier l'effet d'hystérésis dans une des 5 catégories: **A.** Linéaire (pas d'hystérésis, où le HI est très proche de 0 et le pic du débit solide est presque coïncident avec celui du débit liquide); **B.** Directe (dans le sens des aiguilles du montre, quand le HI est moyennement positif → des sources de sédiments proches); **C.** indirecte (dans le sens contraire des aiguilles du montre, quand le HI est moyennement négatif → des sources de sédiments plus éloignées); **D.** La forme de 8 (combinaison des types B et C → des sources des domaines différents, à la fois du lit et des versants); **E.** Complexe (avec plusieurs boucles d'hystérésis, typiquement lors des crues de longue durée avec plusieurs pics). Suivant ces critères, nous avons attribué les effets d'hystérésis lors des 10 crues étudiées aux 22 stations hydrométriques à un des 5 catégories symbolisées avec :

- || - la relation linéaire entre le débit liquide et le débit solide ;
- ☺ - la relation directe ;
- ☹ - la relation indirecte ;

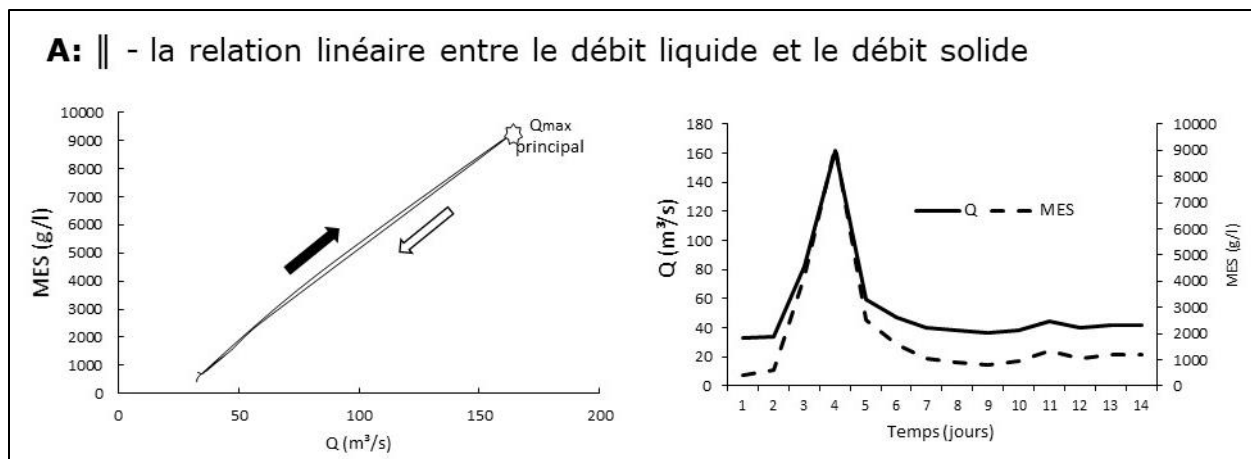
- $\infty$  - la relation sous la forme de 8 ;
- $\oplus$  - la relation complexe.

Dans le **Tableau V.14** nous avons présenté les types d’hystérésis, considérés selon les 5 critères.

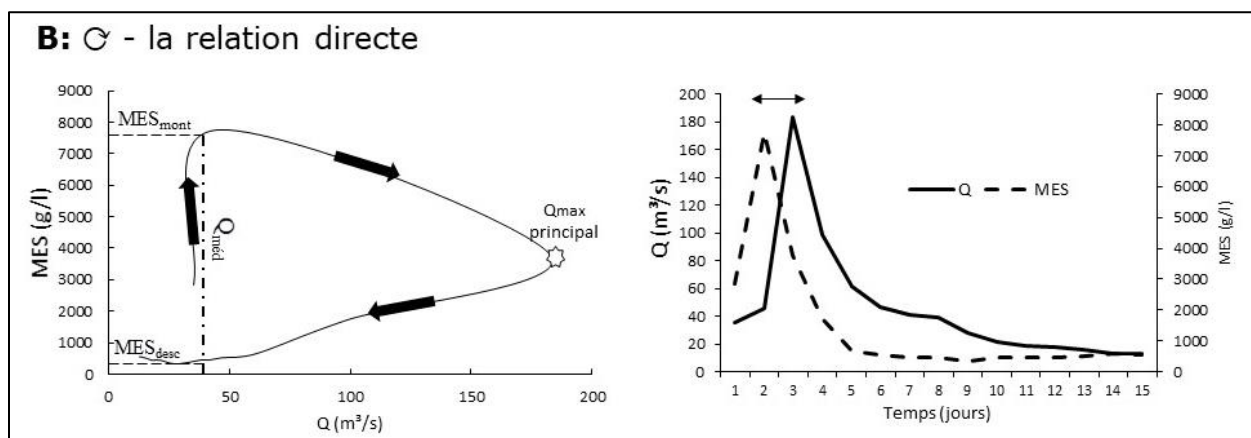
**Tableau V.14.** Le type d’hystérésis selon la relation entre les débits solides et liquides des 10 crues étudiées. Les situations sans symbole ce sont des stations hydrométriques où la crue en cause ne s’est pas passée (nous n’avons pas eu la possibilité de calculer un indice d’hystérésis, car il n’y avait pas d’augmentation du débit)

Ordre hydro	Station hydrométrique	Mar-06	Nov-07	Aug-05	Nov-04	Apr-06	Jan-09	Oct-07	Jul-05	Nov-09	Apr-03
7	Bărbăteni				$\oplus$			Q		Q	Q
58	Broșteni			$\infty$	$\oplus$	$\infty$					
67	Bustuchin	Q			$\oplus$		Q				$\oplus$
5	Câmpu lui Neag				$\oplus$	$\oplus$			$\oplus$		$\infty$
29	Celei								$\oplus$		Q
60	Corcova			Q	$\oplus$	$\oplus$			Q		$\oplus$
63	Fața Motrului			$\oplus$					Q		$\infty$
48	Filiași			$\oplus$			$\oplus$		$\oplus$		$\oplus$
9	Iscroni		$\infty$	$\infty$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	Q	$\oplus$	$\oplus$	$\infty$
10	Lonea			$\oplus$	$\oplus$						
11	Lonea Taia	Q						Q			
74	Podari	Q	Q	$\oplus$	$\oplus$	Q	Q	$\infty$	$\oplus$	$\oplus$	Q
64	Răcari	Q	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$		$\oplus$	$\infty$	$\oplus$	Q	$\oplus$
34	Rovinari				$\oplus$						
20	Sadu		$\infty$	$\oplus$	$\oplus$	Q	Q	Q	$\oplus$	Q	$\oplus$
62	Strehaia	Q	Q	$\oplus$		Q			$\oplus$		Q
46	Telești	$\oplus$	$\infty$		$\oplus$	$\oplus$	Q		$\oplus$		$\oplus$
43	Târgu Cărbunești				$\oplus$	$\oplus$	$\infty$		$\infty$	Q	$\oplus$
47	Turburea	$\oplus$			Q		Q	Q		Q	Q
38	Turceni	Q	Q	$\oplus$	$\oplus$	Q					
6	Valea de Pești		$\infty$		$\oplus$		Q	Q			
75	Zăval	Q	Q	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	Q		$\oplus$	Q	$\oplus$

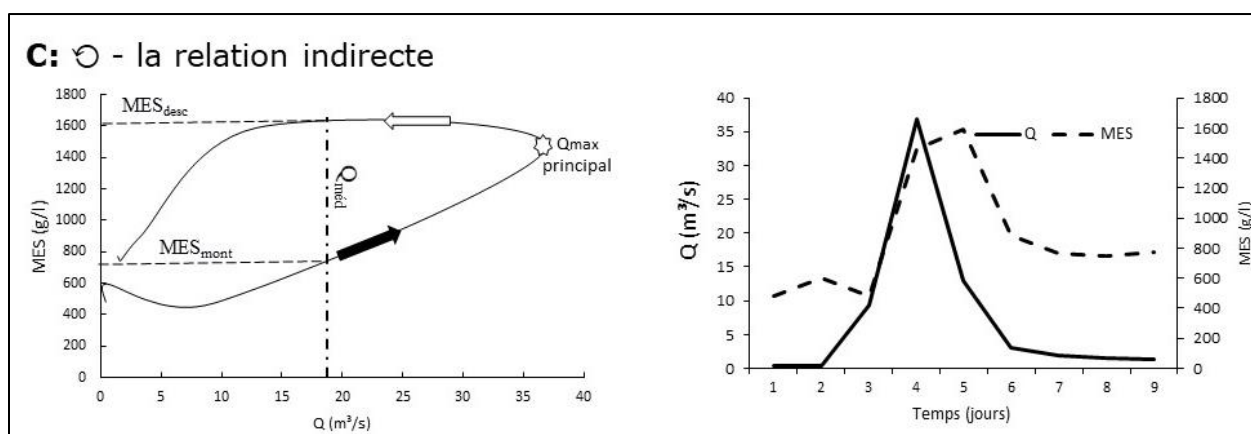
Comme titre d’exemple, nous avons sélectionné pour la représentation quelques exemples typiques de boucles hystériques obtenues (**Figures V.53 – V.57**). Sur chaque graphique, nous avons représenté la partie montante (les zones marquées avec des flèches noires), la partie descendante (les zones marquées par des flèches blanches), le débit maximal, le débit médian ( $Q_{méd}$ ), utilisé pour le calcul de l’indice hystérique ( $HI_{méd}$ ) et les différentes boucles d’hystérésis sur les graphiques des relations complexes.



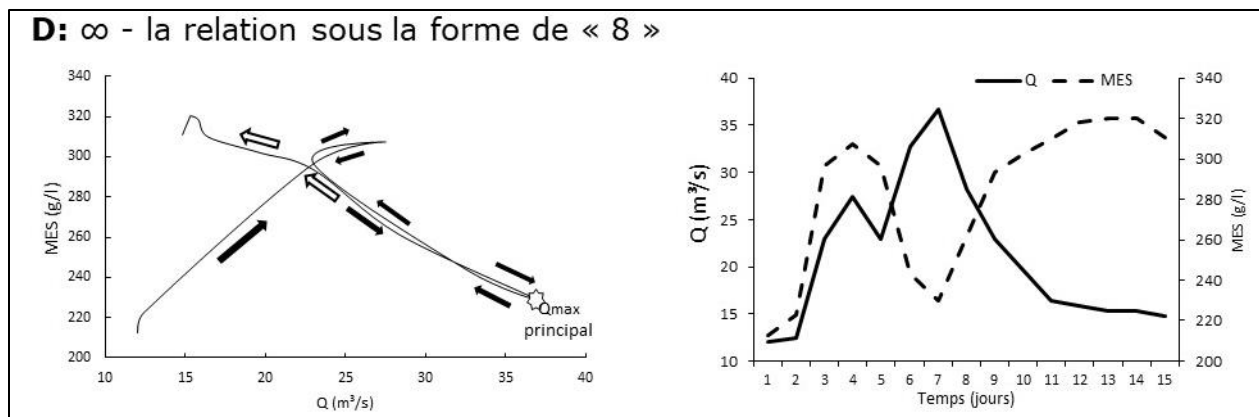
**Figure V.53.** Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. **A** (relation linéaire): s.h. Turburea, r. Gilort (Avril 2006)



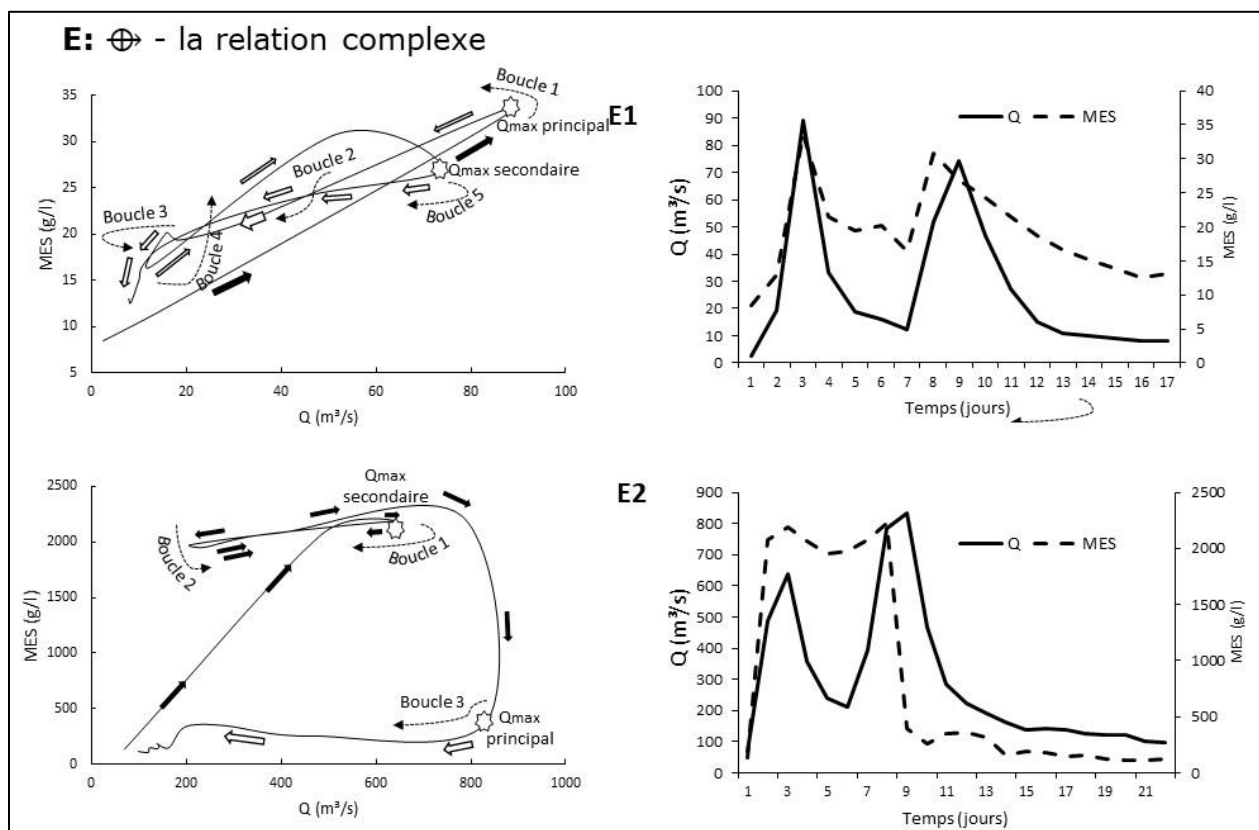
**Figure V.54.** Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. **B** (relation directe): s.h. Turburea, r. Gilort (Novembre 2004)



**Figure V.55.** Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. **C** (relation indirecte) : s.h. Turceni, r. Jilț (Novembre 2007)



**Figure V.56.** Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. **D** (relation sous la forme de 8) : s.h. Iscroni, r. Jiu (Avril 2003)



**Figure V.57.** Exemples de boucles d'hystérésis représentatives pour les crues analysées. **E** (relation complexe) - E<sub>1</sub> : s.h. Bărbățeni, r. Jiu de l'Ouest (Novembre 2004) et E<sub>2</sub> : s.h. Podari, r. Jiu (Novembre 2004)

Parmi les 10 crues analysées aux 22 stations hydrométriques, 62 ont été caractérisées par une *relation linéaire*, qui implique une alimentation en continu avec de sédiments, de façon que le débit liquide est toujours en phase avec la concentration des matières en suspension [Dumitriu, 2017]. Ce type hystérétique est ainsi indiqué par le fait que les graphiques du débit liquide et la concentration des matières en suspension enregistrent des pics en même temps ; ils présentent une distribution similaire sur l'axe



temporelle de la partie montante et la partie descendante de l'hydrogramme de la crue. Ces situations sont généralement rarement observées dans d'autres études ; des événements  $Q \sim \text{MES}$  quasi-coïncidents sont typiques dans la plupart des petits bassins, à cause de la translation lente en aval des sédiments et des ondes d'eau associées [Lawler *et al.*, 2006]. Nous notons dans cette catégorie notamment la s.h. Rovinari sur la Jiu, avec les relations  $Q - \text{MES}$  pour la plupart des crues sous la forme linéaire (l'augmentation et la diminution des débits liquides et solides se font en même temps, ce qui peut être expliquée par l'apport constant de sédiments en fonction du débit liquide, dans les conditions de manque de sources éloignées des versants (les seuls possibles apports sont les rivières Tismana et Amaradia Pietroasă (avec plutôt du grossier que des fins en suspension), tandis que la Jiu amont ne contribue pas autant à cause des réservoirs de Târgu Jiu et Vădeni, qui stockent les sédiments. Seulement dans le cas d'une crue à fort débit solide, les alluvions de l'amont se font évacués en aval des barrages, situation qu'on peut confirmer avec la crue de novembre 2004, la seule à l'occasion de laquelle la relation  $Q \sim \text{MES}$  a été complexe. Cela peut être mis en cause avec le débit maximum atteint à s.h. Rovinari de  $438 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , qui dépasse seulement de  $18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  celui de la crue d'octobre 2007, quand l'effet hystérétique s'est toujours maintenu linéaire. On peut parler dans ce contexte d'un seuil de débit autour du  $Q_{\text{max}} = 430 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , quand le comportement hystérétique à s.h. Rovinari commence à être observé, soit par l'activation de différentes sources supplémentaires d'alluvions, soit pas l'ouverture des vannes aux barrages en amont.

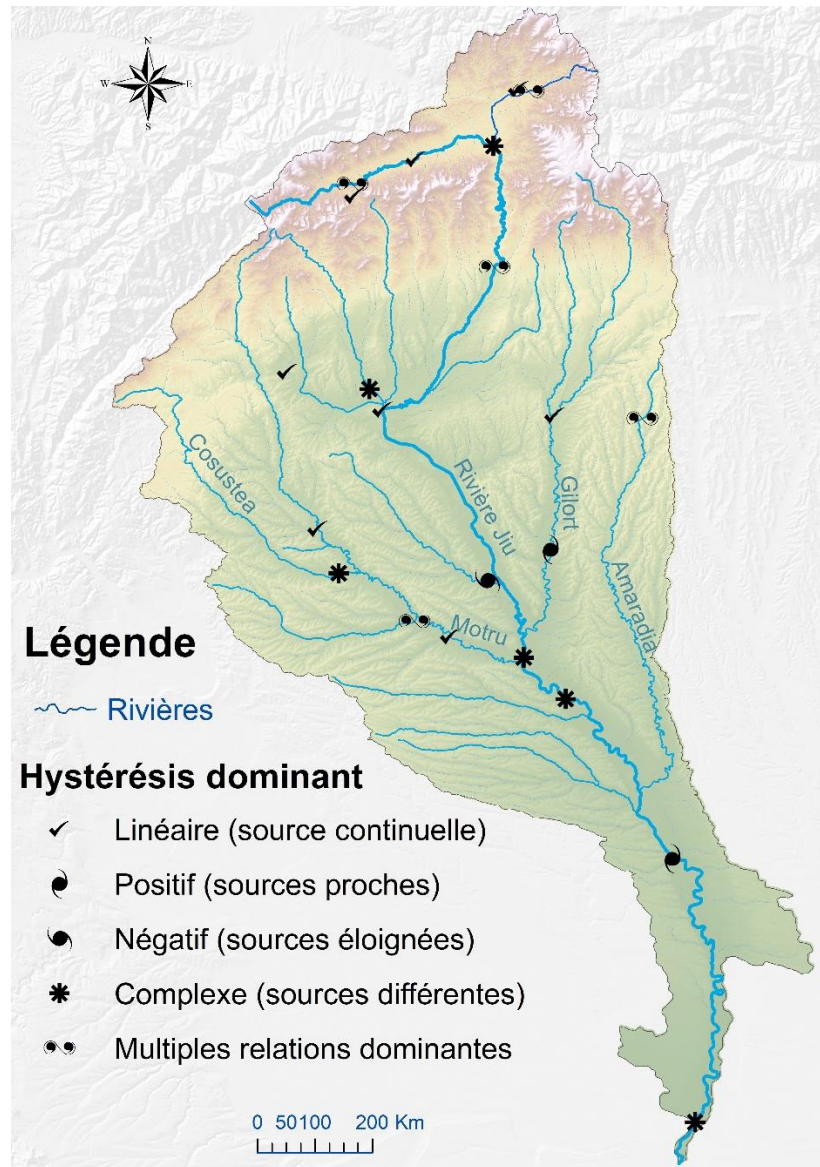
La relation *type* « *sens horaire* » ou « *directe* » a été observée pour 23 des cas, notamment aux stations hydrométriques de Sadu, Podari et Turburea. Cette situation montre que le transport des sédiments pendant les crues est plus rapide que l'onde de l'eau. Dans les deux premiers cas, le comportement hystérétique dans le sens horaire le plus fort a été observé sur la rivière Jiu, en amont et aussi en aval, causé par la remobilisation rapide des sédiments stockés dans le lit mineur et dans la plaine alluviale. Dans le troisième cas, sur la Gilort, il y a probablement un stock d'alluvions dans le lit mineur et majeur qui se met en suspension très rapidement, menant à une attente du maximum solide avant celui du débit liquide.

Les boucles *antihoraires* sont spécifiques aux stations situées en aval de sources de sédiments éloignées (sur les versants), qui fournissent des matériaux déposés et puis reprises en suspension à une vitesse plus lente après le point critique où la pente diminue. Quelques exemples de zones de la rivière qui fonctionnent comme des cuvettes ou ralentissements pour les ondes de sédiments durant les crues sont visibles aux stations hydrométriques de Turceni et Corcova, avec des sédiments fins provenant des zones de production lointaines.

La relation sous forme de la *chiffre* « 8 » ou *l'infini* est une combinaison des boucles horaires et antihoraires, lorsque différents types de sources (à la fois du lit, des berges et des versants) concurrent à fournir des sédiments fins [Dumitriu, 2017]. Ce type de relation est aussi rare que celui des boucles antihoraires (9 cas) et a été surtout observée aux s.h. Târgu Cărbunești et Iscroni.

La relation complexe caractérisée 42 des cas est a été observée notamment pour des crues à multiples pics, aux stations aval, près des confluences, ou situées dans des zones de changement de la morphométrie. Plus la durée de la crue est grande (15 – 20 jours), plus des multiples sources de sédiments peuvent s’activer et compliquer la relation hystérétique.

La **Figure V.58** illustre les relations hystérétiques les plus fréquentes trouvées aux stations hydrométriques analysées, avec des symboles différents selon la relation hystérétique prédominante.



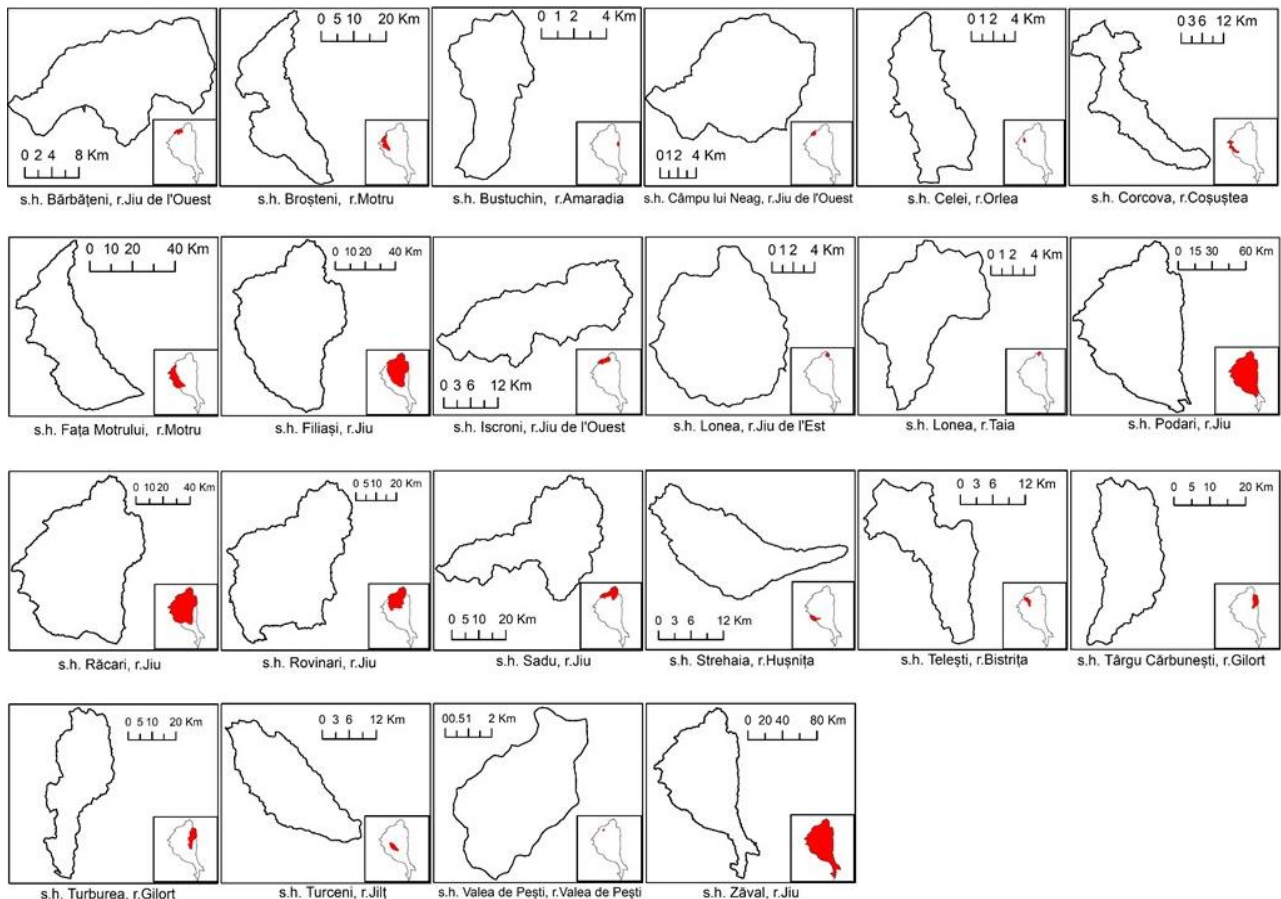
**Figure V.58.** Relations hystérétiques dominantes aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu

A travers l’analyse de l’hystérésis, nous avons examiné les relations spatiales et temporelles entre le débit liquide ( $Q$ ) et la concentration des matières en suspension (MES), en calculant un indice synthétique pour les plus grandes 10 crues de la période 2001 – 2010.

Dans la plupart des cas, il y a une relation linéaire ou complexe entre le débit liquide et la concentration des matières en suspension. Dans d'autres situation, on s'est trouvé dans le cas de la relation horaire (directe), quand le maximum des MES précède le pic du débit liquide, ce qui se traduit sur les rivières concernées par une concentration plus haute des sédiments par rapport au débit au même moment dans le temps. Il y a moins de situations avec un hystérésis faible ou même négatif (relation antihoraire), où les valeurs des MES.

### 5.3.6. Les relations entre les débits solides et les variables de contrôle morpho-lithologiques des bassins versants

L'influence des caractéristiques du bassin versant sur l'apport de sédiments fins a été largement reconnu [Dietrich *et al.*, 2003 ; Rădoane, 2003; Jansen *et al.*, 2011]. Cette partie de notre étude a pour objectif d'analyser les relations entre les débits des alluvions en suspension et différents paramètres morphométriques et lithologiques dans le bassin de la rivière Jiu, afin d'identifier les variables les plus susceptibles d'influencer le flux sédimentaire. Nous avons utilisé tous les sous-bassins versants en amont des 22 stations hydrométriques disposant de mesures des débits d'alluvions en suspension (**Figure V.59**).



**Figure V.59.** La localisation des 22 bassins versant en amont des stations hydrométriques utilisées dans l'analyse

### 5.3.6.1. L'approche méthodologique

Pour identifier comment les débits d'alluvions en suspension des sous-bassins versants répondent aux caractéristiques intrinsèques invariantes de la zone de drainage, 16 variables reflètent des attributs morphométriques et lithologiques ont été utilisées dans les analyses multivariées. Le **Tableau V.15** présente les 16 paramètres utilisés dans l'analyse et les procédures de calcul.

**Tableau V.15.** Les paramètres utilisés dans l'analyse des relations entre les débits d'alluvions en suspension et les variables de contrôle

	Français	Anglais
Par. 1	Supérficie (km <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )
Par. 2	Altitude moyenne (m)	Average Altitude (m)
Par. 3	Pente (°)	Slope (°)
Par. 4	Perimètre (km)	Perimeter (km)
Par. 5	Rapport de circularité	Circularity ratio
Par. 6	Longueur du bassin (Km)	Basin length (Km)
Par. 7	Facteur de forme	Form Factor
Par. 8	Rapport de longueur	Elongation ratio
Par. 9	Rugosité de surface	Surface roughness
Par. 10	Densité de drainage	Drainage density
Par. 11	Coefficient de maintenance	Maintenance coefficient
Par. 12	Rapport de relief	Relief ratio
Par. 13	Intégrale hypsométrique	Hypsometric Integral
Par. 14	DoD	DoD
Par. 15	Argiles	Clay
Par. 16	Marnes	Marls

Les paramètres 1 – 4 sont connus comme paramètres morphométriques de base dans l'analyse des bassins versants, tandis que les autres ont été calculés soit à la base de la géométrie du bassin versant, soit à partir du modèle numérique de terrain, soit estimés en pourcentage occupé dans la superficie totale d'un bassin versant. Les autres paramètres s'obtiennent avec les formules suivantes :

$$C_r = (4\pi \times S) / P_b^2$$

$$F_f = S / L_b^2$$

$$R_e = 2/L_b \times \sqrt{(S/\pi)}$$

$$M_c = 1 / D_d$$

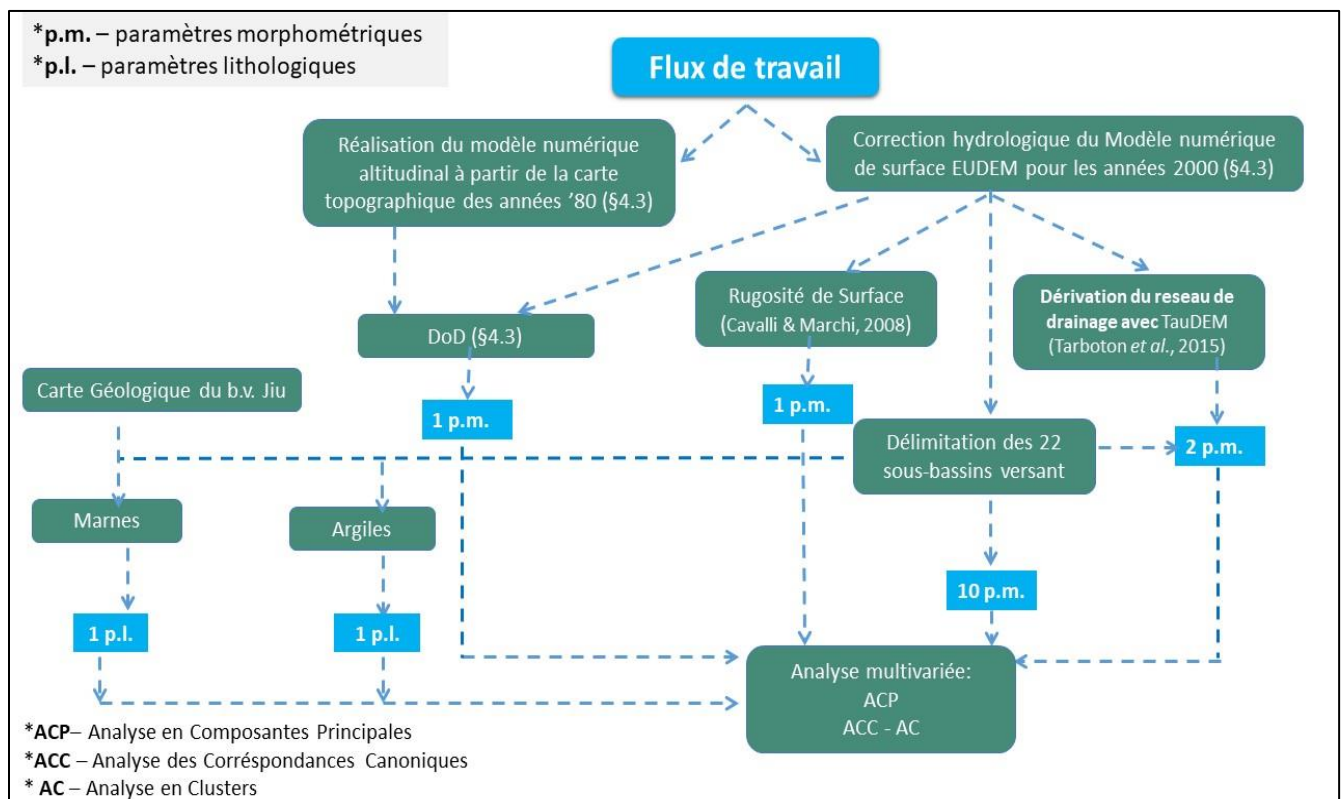
$$R_r = (H_{\max} - H_{\text{moy}}) / L_b$$

$$I_h = (H_{\text{moy}} - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min})$$

Où  $C_r$  = rapport de circularité ;  $P_b$  = périmètre du bassin (km) ;  $S$  = superficie du bassin (km<sup>2</sup>) ;  $F_f$  = facteur de forme ;  $L_b$  = Longueur du bassin (km) ;  $R_e$  = rapport de longueur ;  $M_c$  = coefficient de maintenance ;  $D_d$  = densité hydrographique (km/km<sup>2</sup>) ;  $R_r$  = rapport de relief ;  $I_h$  = Intégrale hypsométrique,  $DoD$  = DEM of différence

Les paramètres morphométriques ont été dérivés du modèle altimétrique numérique sur l'Europe (EU-DEM) à une résolution de 25 m de pixel soustraite pour le bassin de la rivière Jiu, alors que pour les classes lithologiques, la carte géologique roumaine (1:200 000) a été utilisée. L'analyse en composantes principales (ACP) a été mise en œuvre pour examiner les relations structurelles entre les 16 variables et le débit des alluvions en suspension moyen multiannuel (MES<sub>moy2001 - 2010</sub>), respectivement maximum multiannuel (MES<sub>max2001 - 2010</sub>), afin de réduire leur nombre en vue d'une nouvelle interprétation des principaux paramètres. Ceci a été complétée par la sélection des principales variables explicatives pour la variation spatiale des débits d'alluvions en suspension dans les sous-bassins versants obtenus avec l'analyse de correspondance canonique (ACC), à la base de la technique de clusters.

Dans la **Figure V.60** nous présentons le schéma du flux de travail de l'analyse corrélative entre la concentration des matières en suspension et les variables considérées.

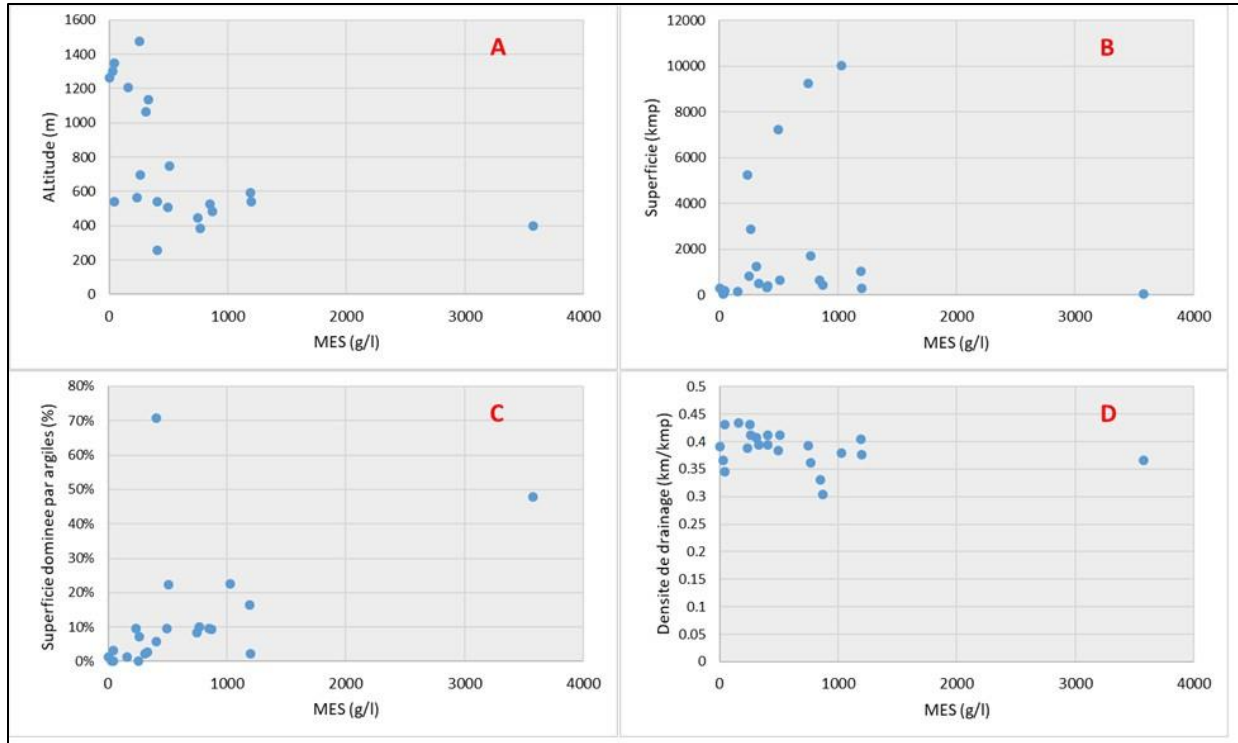


**Figure V.60.** Flux de travail de l'analyse des relations entre les débits solides et les paramètres morpho-lithologiques des bassins versants



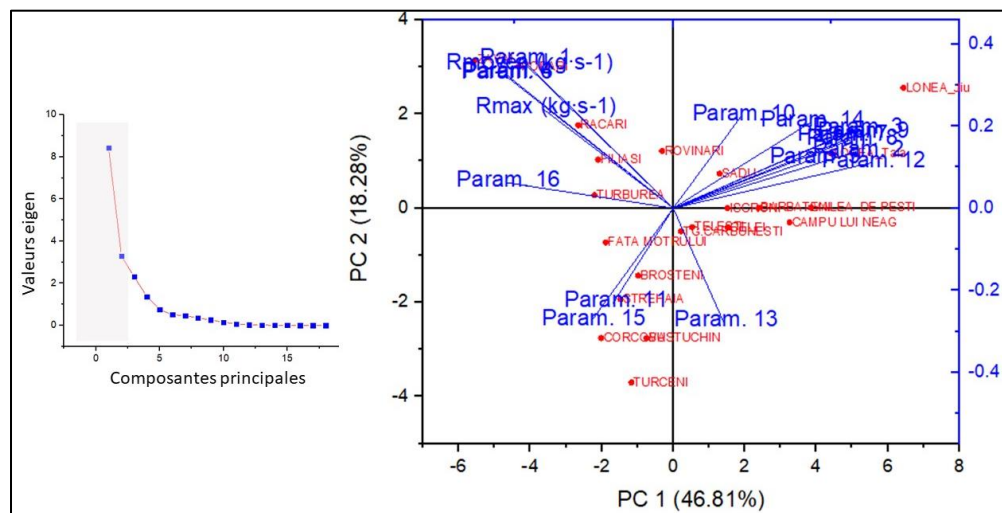
### 5.3.6.2. Résultats

La **Figure V.61** illustre les relations entre les concentrations des alluvions en suspension (MES) et une sélection des paramètres des bassins versant correspondant aux stations hydrométriques.



**Figure V.61.** Les relations entre les MES multi-annuelles et différents paramètres morpho-lithologiques des bassins versant étudiés : **A** – MES ~ l'altitude moyenne ; **B** – MES ~ la superficie ; **C** – MES ~ la densité de drainage ; **D** – MES ~ les formations sédimentaires argileuses

Les résultats ont montré que l'effet de la morphométrie et du type de roche prédominante est significatif pour les petits sous-bassins de montagne ou des têtes des bassins (<200 km<sup>2</sup>) (**Figure V.62**).



**Figure V.62.** Les résultats de l'analyse en composantes principales de la relation entre la concentration des matières en suspension et les paramètres morpho-lithologiques étudiés

Les coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs moyennes et maximales multiannuelles des concentrations des matières en suspension et les 16 paramètres aux 22 stations hydrométriques sont synthétisés dans le *Tableau V.16*.

**Tableau V.16.** Matrice des coefficients de corrélation de Pearson entre  $MES_{moy.multiannuels}$ ,  $MES_{max.multiannuels}$  et les paramètres morpho-lithologiques (notés dans le tableau ci-dessous Par1 ... Par16)

	Par. 1	Par. 2	Par. 3	Par. 4	Par. 5	Par. 6	Par. 7	Par. 8	Par. 9	Par. 10	Par. 11	Par. 12	Par. 13	Par. 14	Par. 15	Par. 16	Rmoyen	Rmax
Par. 1	1.0	-0.4	-0.3	1.0	-0.2	1.0	-0.3	-0.3	-0.4	0.0	0.0	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.7	0.9	0.6
Par. 2	-0.4	1.0	1.0	-0.5	0.6	-0.5	0.6	0.6	0.9	0.2	-0.2	0.8	0.1	0.5	-0.4	-0.6	-0.4	-0.4
Par. 3	-0.3	1	1.0	-0.4	0.5	-0.4	0.6	0.7	1.0	0.2	-0.2	0.8	0.0	0.6	-0.6	-0.7	-0.3	-0.3
Par. 4	1.0	-0.5	-0.4	1.0	-0.4	1.0	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	0.0	-0.6	-0.4	-0.3	0.0	0.7	0.9	0.6
Par. 5	-0.2	0.6	0.5	-0.4	1.0	-0.3	0.8	0.8	0.5	0.3	-0.4	0.7	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.2	-0.4
Par. 6	1.0	-0.5	-0.4	1.0	-0.3	1.0	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	0.0	-0.6	-0.4	-0.3	0.0	0.7	0.9	0.6
Par. 7	-0.3	0.6	0.6	-0.4	0.8	-0.4	1.0	1.0	0.7	0.4	-0.4	0.8	0.1	0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-0.4
Par. 8	-0.3	0.6	0.7	-0.4	0.8	-0.4	1.0	1.0	0.7	0.4	-0.4	0.8	0.2	0.5	-0.2	-0.4	-0.3	-0.4
Par. 9	-0.4	0.9	1.0	-0.4	0.5	-0.4	0.7	0.7	1.0	0.1	-0.1	0.9	-0.1	0.7	-0.6	-0.7	-0.4	-0.4
Par. 10	0.0	0.2	0.2	-0.1	0.3	-0.1	0.4	0.4	0.1	1.0	-1.0	0.2	0.2	0.3	-0.1	-0.2	0.0	0.1
Par. 11	0.0	-0.2	-0.2	0.0	-0.4	0.0	-0.4	-0.4	-0.1	-1.0	1.0	-0.2	-0.2	-0.3	0.0	0.2	0.0	-0.1
Par. 12	-0.5	0.8	0.8	-0.6	0.7	-0.6	0.8	0.8	0.9	0.2	-0.2	1.0	0.1	0.7	-0.5	-0.7	-0.4	-0.4
Par. 13	-0.4	0.1	0.0	-0.4	0.3	-0.4	0.1	0.2	-0.1	0.2	-0.2	0.1	1.0	-0.1	0.6	-0.1	-0.3	-0.4
Par. 14	-0.2	0.5	0.6	-0.3	0.2	-0.3	0.4	0.5	0.7	0.3	-0.3	0.7	-0.1	1.0	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2
Par. 15	0.0	-0.4	-0.6	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.1	0.0	-0.5	0.6	-0.5	1.0	0.3	0.1	0.1
Par. 16	0.7	-0.6	-0.7	0.7	-0.2	0.7	-0.4	-0.4	-0.7	-0.2	0.2	-0.7	-0.1	-0.5	0.3	1.0	0.5	0.4
Rmoyen	0.9	-0.4	-0.3	0.9	-0.2	0.9	-0.3	-0.3	-0.4	0.0	0.0	-0.4	-0.3	-0.2	0.1	0.5	1.0	0.6
Rmax	0.6	-0.4	-0.3	0.6	-0.4	0.6	-0.4	-0.4	-0.4	0.1	-0.1	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.4	0.6	1.0

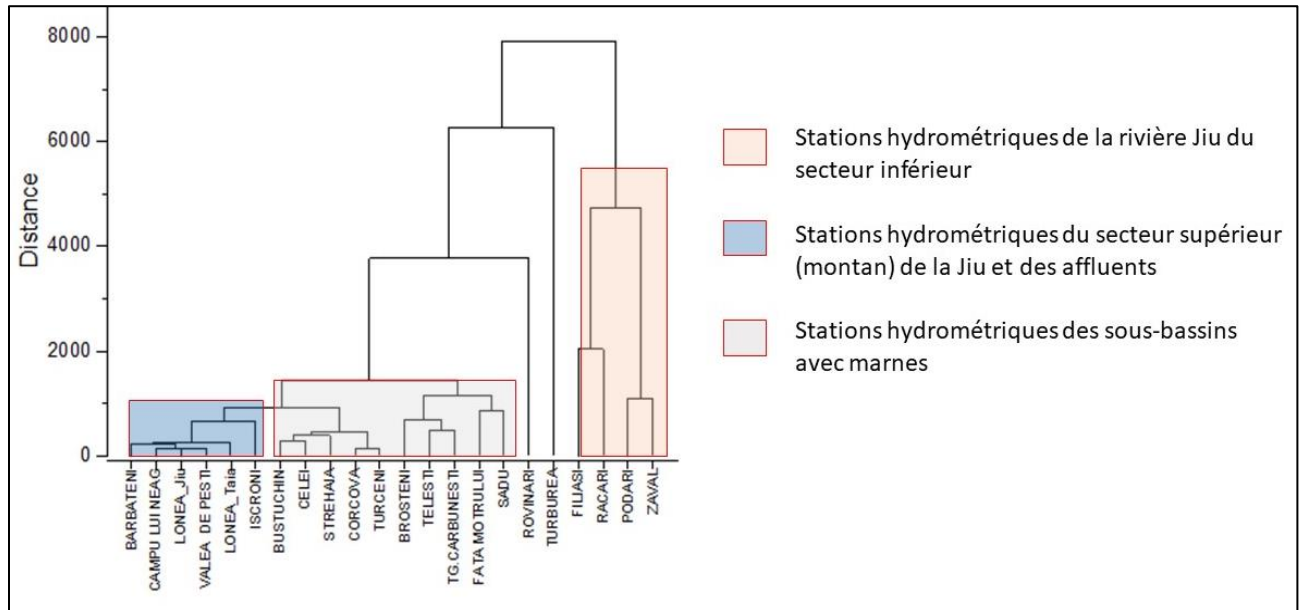
L'analyse ACP a montré comment les stations hydrométriques sont regroupées en fonction des paramètres constituant les deux premières composantes.

Parmi les résultats les plus notables, la couverture sédimentaire des sous-bassins est principalement liée aux taux élevés d'apport de sédiments fins en régime de hautes eaux, tandis que, parmi les paramètres morphométriques, ceux relatifs à la forme et à l'hypsométrie des bassins expliquent plupart de la variation moyenne de la concentration de sédiments en suspension (> 75%).

Cependant, les analyses multivariées n'ont pas complètement réussi à expliquer les irrégularités entre les différents sous-bassins versants en termes de taux maximaux de charge en sédiments en suspension, probablement en raison de l'influence d'autres variables qui n'ont pas été prises en compte dans la présente étude (par exemple des particules de sédiment dispersées lors de forts épisodes de crue, dépendant fortement de la stabilité des pentes et de la présence de la végétation ligneuse).

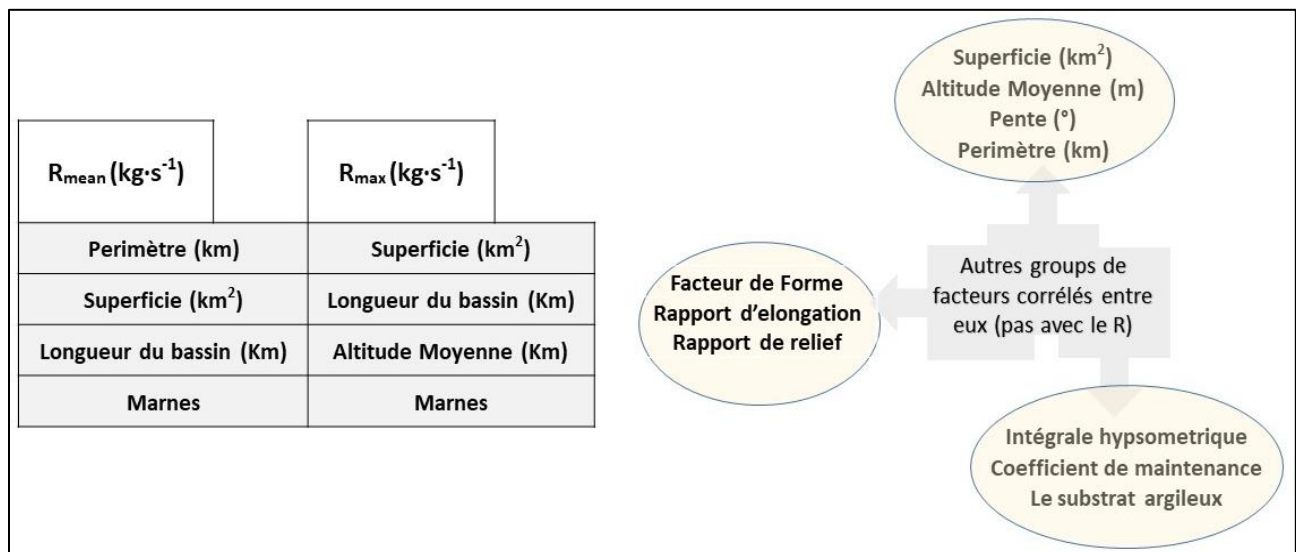
L'analyse cluster a mis l'accent sur les principaux groupes de sous-bassins, basés sur les caractéristiques morphométriques et lithologiques (*Figure V.63*). Ces groupes sont cohérents spatialement (appartiennent aux mêmes unités morphologiques ou bassins versants). En analysant les caractéristiques des bassins versants en relation avec la variation des valeurs des concentrations de matières en suspension,

il a été possible de comparer des bassins versants de tailles différentes, mais qui fournissent en même temps la même quantité de sédiments aux moments clés des crues.



**Figure V.63.** Les résultats de l'analyse Cluster sur les groupes d'appartenance de sous-bassins (stations hydrométriques) aux mêmes caractéristiques morpho-lithologiques

Un des résultats les plus importants a été que la rugosité du terrain a un rôle important dans le transfert des matières en suspension. D'autres paramètres qui semblent être bien corrélés avec les concentrations de matières en suspension (moyenne et maximales) des 22 stations hydrométriques, ainsi qu'entre eux, sont synthétisés dans le **Figure V.64**.



**Figure V.64.** Les paramètres morpho-lithologiques explicatifs les plus corrélés avec les  $MES_{\text{max.multiannuels}}$  et  $MES_{\text{moy.multiannuels}}$

## *Synthèse du chapitre*

Dans le chapitre 5, nous avons traité exhaustivement les séries hydrologiques des données aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu, suivant des approches à la fois standard statistiques et des méthodes propres, qu'on a implémenté pour mettre en évidence certains aspects caractéristiques de l'écoulement et du transport solide.

Après avoir présenté le réseau de mesure dans le bassin de la rivière Jiu et les instruments/ protocoles utilisés, nous nous sommes assurés que les débits peuvent être utilisés avec peu d'incertitudes, en employant des tests statistiques pour analyser la stationnarité, l'homogénéité et l'indépendance des débits. Nous avons montré quelles sont les années de rupture à partir desquelles nous avons ensuite divisé les séries de débits liquides pour beaucoup d'analyses. En ce qui concerne les débits d'alluvions en suspension, nous avons vérifié si les valeurs calculées/ estimées sont proches des valeurs réelles mesurées pendant l'année.

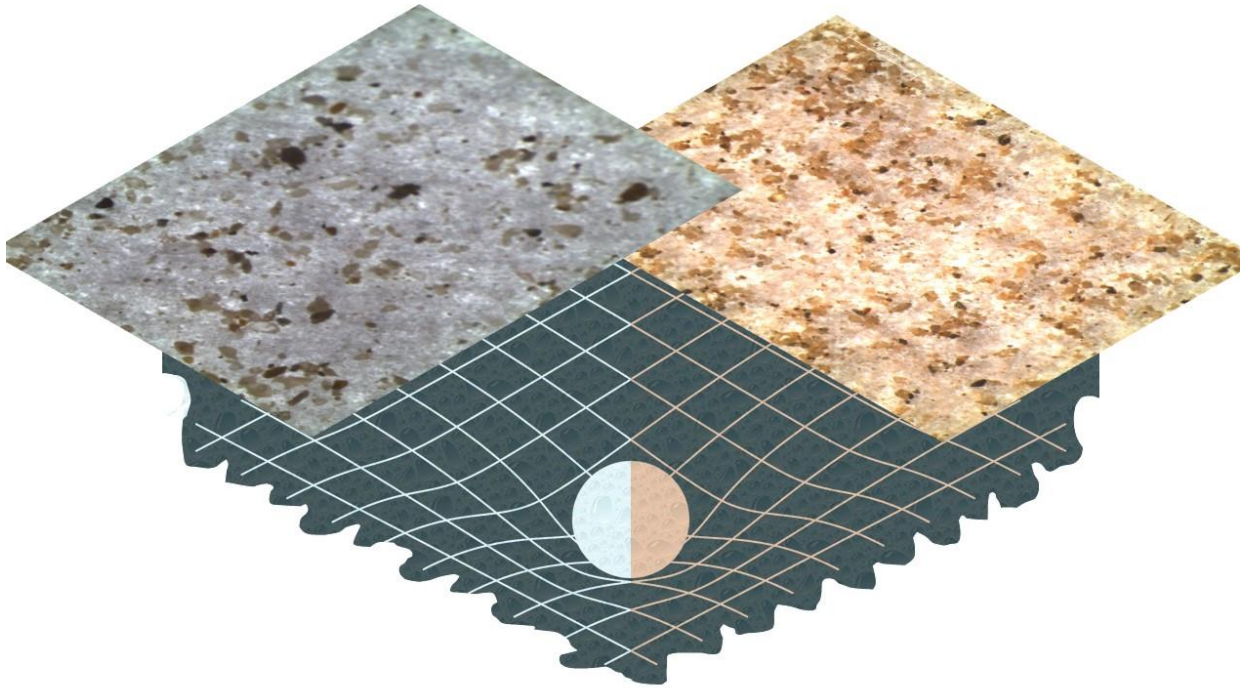
Les analyses hydrologiques suivantes ont été complexes et adéquates pour illustrer la variabilité spatio-temporelle des débits liquides et solides (à l'échelle interannuelle, mensuelle et de la crue), les relations amont – aval à différents pas de temps, le transfert d'eau et d'alluvions pendant les crues, les sous-bassins versants avec des contributions plus importantes et la vitesse de propagation des crues.

Dans des approches finales plus avancées, nous avons essayé de trouver des possibles facteurs et types de sources de sédiments, en étudiant la relation hystérétique entre les débits liquides et solides lors des crues de la période 2001 – 2010, ainsi que l'influence de la morphométrie et lithologie sur la variabilité spatiale des débits d'alluvions en suspension.

Tout ce qu'on a réussi à obtenir dans ce chapitre nous sera utile dans la deuxième partie de la thèse, où nous allons relier les dépôts d'alluvions de leurs possibles sources de l'amont, en étudiant les contributions des sous-bassins versant durant les crues susceptibles à avoir transféré et déposé la matière sédimentaire.

## Deuxième Partie

### Echelles spatio-temporelles dominant le transfert hydro-sédimentaire





## Chapitre 6.

### Quels sont les apports de sédiments en crue ? Aspects théoriques et pistes de recherche

<b>6.1. Bilan ou budget sédimentaire ?</b> .....	293
<b>6.2. Le transport des sédiments par charriage et en suspension. Quel choix ?</b> .....	296
6.2.1. Aspects théoriques généraux sur les transports par charriage et en suspension.....	296
6.2.2. Quelle approche pour l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire ? .....	302
<b>6.3. Démarche : analyse d'une archive sédimentaire récente</b> .....	303
6.3.1. L'archive sédimentaire – c'est quoi ? .....	303
6.3.2. Une archive sédimentaire sur la rivière Jiu .....	307
6.3.2. Mécanismes de dépôt sédimentaire dans le lit majeur .....	309
6.3.3. Hypothèses de l'analyse du dépôt sédimentaire.....	311
6.3.4.1. H1 : Chaque couche alluviale a été déposée lors d'un seul événement d'inondation .....	311
6.3.4.2. H2 : Les processus d'érosion de la couche supérieure sont négligeables.....	312
6.3.4.3. H3 : L'accumulation sur la berge est récente et stable.....	314
6.3.5. Pourquoi on ne peut pas utiliser les sédiments du lit mineur pour ce travail? .....	315
<b>Synthèse du chapitre</b> .....	315

Dans la première partie de la thèse, nous avons analysé le bassin hydrographique de la rivière Jiu dans la perspective systémique qui intègre les facteurs naturels et anthropiques contrôlant la variabilité des flux liquides et solides. Dans cette seconde partie de la thèse, nous allons changer d'échelle d'analyse, à la fois temporelle et spatiale. Nous avons remarqué dans les chapitres précédents que les données hydrologiques dont nous disposons ne nous permettaient pas l'approche complète des processus hydro-sédimentaires au niveau du bassin versant de chaque station hydrométrique. De plus, même si les données étaient suffisantes et avec une très bonne résolution temporelle (infra-journalière), l'espace, le temps et les ressources de la thèse ne nous permettraient toujours pas de valoriser toutes ces données. Par conséquent, nous avons choisi de focaliser les analyses sur des aspects particuliers de la dynamique hydro-sédimentaire à des échelles spatiales et temporelles plus fines.

\*\*\*

Nous rappelons notre objectif principal d'analyser les flux liquides et solides du système de la rivière Jiu à travers les échelles spatiales et temporelles caractéristiques. Cet objectif est toujours plus vif après l'exposé de l'état de l'art et compte tenu des conclusions de l'analyse préliminaire des facteurs naturels et anthropiques contrôlant la dynamique hydro-sédimentaire.

- En premier lieu, ce chapitre expliquera le choix que nous ferons d'analyser les sédiments en suspension plutôt que la charge de fond, en fonction des données nécessaires, de la précision requise de l'analyse, de la complexité de l'approche et du temps ainsi que des outils de travail nécessaires.
- Deuxièmement, nous examinerons les possibilités que nous avons en termes de sélection d'un site d'analyse approprié, qui refléterait le type de transport choisi par la suite. Enfin, après avoir expliqué les mécanismes de transport et de dépôt impliqués dans la genèse de l'archive sédimentaire étudiée, le cadre général des travaux reliant le site à la dynamique hydro-sédimentaire de l'ensemble du bassin est présenté.

## ***6.1. Bilan ou budget sédimentaire ?***

Tout processus d'érosion, de transport et de dépôt de sédiments est régi par l'eau. Ainsi, l'eau et les sédiments forment un couple d'agents de modélisation du relief et de transfert de la matière des zones hautes vers les zones basses à faibles pente et énergie.

La plupart des études sur la dynamique des sédiments dans un bassin hydrographique ont comme objectif de mieux comprendre les transferts sédimentaires et de quantifier les volumes de sédiments qui sont mobilisés dans le bassin.

En général, les approches portent sur l'analyse et l'estimation des transferts sédimentaires vers l'embouchure d'un bassin hydrographique, ce qui évoque la notion de budget sédimentaire. Le concept a été largement expliqué et utilisé à plusieurs reprises dans des études portant sur la mobilisation et le mouvement des sédiments aussi bien à l'échelle des parcelles expérimentales (de quelques hectares) que dans des bassins versants de différentes tailles, allant de quelques kilomètres carrés à de grands bassins versants continentaux

[Marron, 1992; Walling *et al.*, 2001]. Nous rappelons ci-après quelques définitions portant sur les notions de budget et de bilan sédimentaire :

- ♣ Le budget des sédiments représente le lien entre les processus d'érosion dans un bassin versant et les flux solides dans les rivières. L'érosion linéaire et verticale du lit de la rivière, ainsi que les processus gravitationnels, constituent les principales sources de sédiments [reformulé après Degoutte, 2004; Obreja, 2009; Elahcene, 2013].

- ♣ « Le bilan sédimentaire décrit l'intrant, le transport, le stockage et l'exportation de sédiments dans un système géomorphique » [Reid et Dunne, 2017].

- ♣ Un budget de sédiments d'un bassin hydrographique est un bilan illustrant la magnitude des sources des sédiments par rapport à la charge sédimentaire à l'exutoire ou à un endroit cible en aval de ces sources [Reid et Trustrum, 2002].

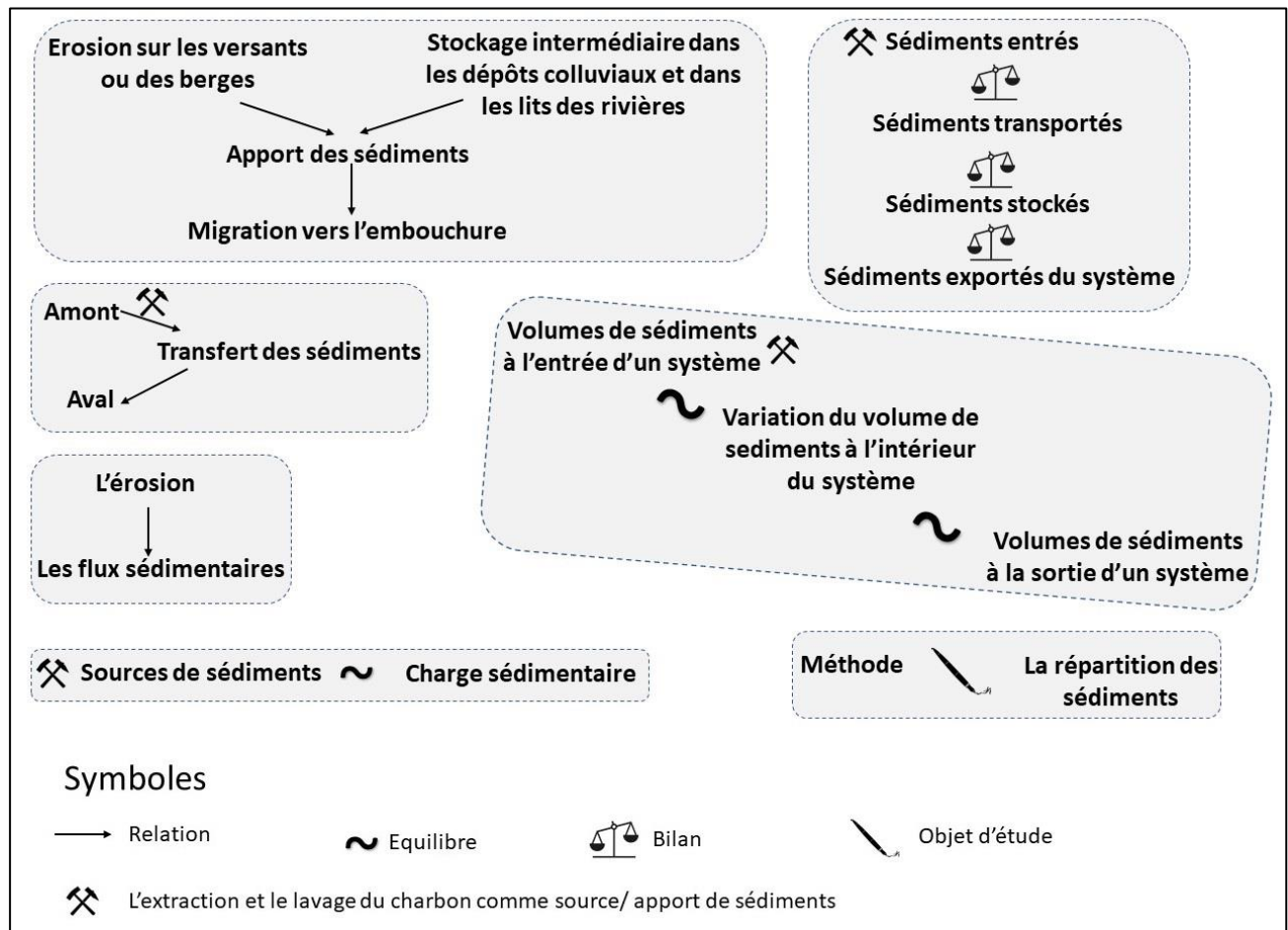
- ♣ « Le bilan sédimentaire peut être défini comme l'équilibre entre les variations du volume de sédiments stockés dans le système et la somme des volumes de sédiments entrants ou sortants du système » [List, 2005].

- ♣ « Le bilan sédimentaire est *une méthode* pour étudier la répartition des sédiments dans différentes parties d'un bassin hydrographique » [Wang *et al.*, 2007]

Nous observons que dans les différentes définitions ci-dessus, les notions de "budget sédimentaire" et "de bilan sédimentaire" sont employées la plupart de temps comme synonymes, bien que quelques différences de démarche dans leur évaluation quantitative ou qualitative puissent exister. Alors que le bilan sédimentaire fait plutôt référence à la somme des entrées et des sorties du système sédimentaire d'un bassin hydrographique, le budget sédimentaire est plus approximatif, laissant ainsi la place à de possibles interprétations en ce qui concerne les processus et mécanismes d'érosion, de transport et d'accumulation dont dépend en fait, le flux sédimentaire quantifié par le bilan. Nous notons également les multiples perspectives de cette notion : vue en tant que concept, ou vue comme la somme des processus qui assurent le lien entre les composants amont et aval d'un système hydro-sédimentaire, ou encore comme une méthode en soi pour étudier la répartition des sédiments entre les sous-bassins (*Figure VI.1*).

Une remarque peut être faite à propos de la distinction entre les apports naturels et anthropiques et de la reconnaissance du rôle du système anthropique dans l'introduction des volumes de sédiments supplémentaires dans le système hydro-sédimentaire. Jusqu'à ce jour nous n'avons pas trouvé de définition du budget sédimentaire qui tienne compte de la contribution éventuelle de l'homme dans la production sédimentaire. Dans le cas du bassin de la rivière Jiu, aucune définition ne serait complète sans mentionner la composante anthropique des sédiments. Lorsqu'on se réfère aux entrées et sorties du système, il semble qu'on pense toujours aux flux de matière d'origine naturelle, mais on ne sait pas où placer la matière produite par l'activité anthropique. On peut donc poser la question : est-ce que le système hydro-sédimentaire est à l'origine du terme compris comme naturel, ou est-ce qu'il inclut aussi des composantes qui naturellement ne peuvent

pas contribuer à la production sédimentaire, mais lorsque l'homme intervient (l'extraction des ressources minérales), il produit un déséquilibre et fait entrer dans le système d'autres sources possibles de sédiments ?



**Figure VI.1.** Synthèse sur la notion de budget sédimentaire en relation avec les enjeux de nos recherches (marques des composantes où la relation entre les activités minières et la production sédimentaire peuvent être incluse)

Pouvons-nous ainsi nous permettre d'explorer les utilisations de ce terme pour le relier à l'objectif de notre recherche, d'analyser la dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu? Pourquoi serions-nous intéressés à ce sujet et quelles limites pouvons-nous considérer dans nos recherches ? Nous présentons ci-après quelques réponses possibles.

*Premièrement*, le bilan sédimentaire est un domaine de recherche fondamental pour la planification de la gestion des sédiments dans un bassin hydrographique. Au chapitre §3, nous avons évoqué les aspects portant sur la gestion hydro-sédimentaire complexe du bassin de la rivière Jiu, menée dans le cadre des plans de gestion des bassins versant, en accord avec la législation Européenne dans le domaine de l'eau, dont la plus importante est la Directive Cadre sur l'eau (2000/60/EU). Le bassin de la rivière Jiu peut être considéré comme une priorité dans ces plans et une zone d'étude clé parmi les bassins des principaux affluents carpatiques roumains du Danube, en ce qui concerne les apports de sédiments et l'évaluation de l'impact des flux solides sur la qualité de l'eau. C'est pour cette raison que nous considérons que même une étude moins quantitative et plus orientée

sur la dimension temporelle des processus, comme celle-ci, pourrait présenter un intérêt pratique au-delà de son intérêt scientifique.

*Deuxièmement*, dans la première partie, nous avons tenté d'aborder le sujet de la dynamique sédimentaire en identifiant simplement les sources et les zones de dépôt des sédiments (voir le chapitre 5 sur les processus et la connectivité amont – aval agissant sur les voies de transport des sédiments dans le bassin de la rivière Jiu). Même en l'absence de calculs précis des volumes de sédiments, nous avons réussi à illustrer sur des cartes les trajectoires possibles des flux de sédiments, ce qui constitue la base préalable de toute évaluation du bilan sédimentaire.

Et  *finalement*, évaluer les informations que nous pouvons fournir pour un bilan sédimentaire nous aide à mieux comprendre les composantes des flux sédimentaires et les limites de leur analyse.

Dans ce qui suit, nous détaillerons les deux types de transport des sédiments dans une rivière et nous montrerons les avantages et les limites que leur étude impliquerait. Toute cette démarche servira à l'objectif principal de cette dissertation, qui peut éventuellement se résumer en une question de bilan sédimentaire. Nous allons donc nous intéresser aux flux de transfert entre les versants et l'aval du bassin versant de la rivière Jiu à travers d'une approche adaptée du mode de transport que nous allons choisir dans les sous-chapitres suivants.

## **6.2. Le transport des sédiments par charriage et en suspension. Quel choix ?**

Dans les rivières, les matières solides sont véhiculées sous la forme dissoute, en suspension ou par charriage, chacune des modalités obéissant à différentes lois de transport [Carbonnel, 2001]. Comme nous l'avons vu au chapitre §4, la teneur totale en matières dissoutes a été analysée séparément en fonction des facteurs géographiques en amont des points de mesure expérimentaux ; celle-ci dépend beaucoup des caractéristiques géologiques et de la qualité de l'eau (composition minéralogique du substrat drainé et sources de pollution) et moins des conditions hydrauliques et géomorphologiques. Le contenu en matières dissoutes est une mesure de toutes les substances inorganiques et organiques présentes dans un liquide sous forme de suspension moléculaire, ionisée ou micro granulaire (colloïdale). Sauf cas particuliers, les solutés n'ont pas d'effets morphologiques en aval [Braudeau, 1951].

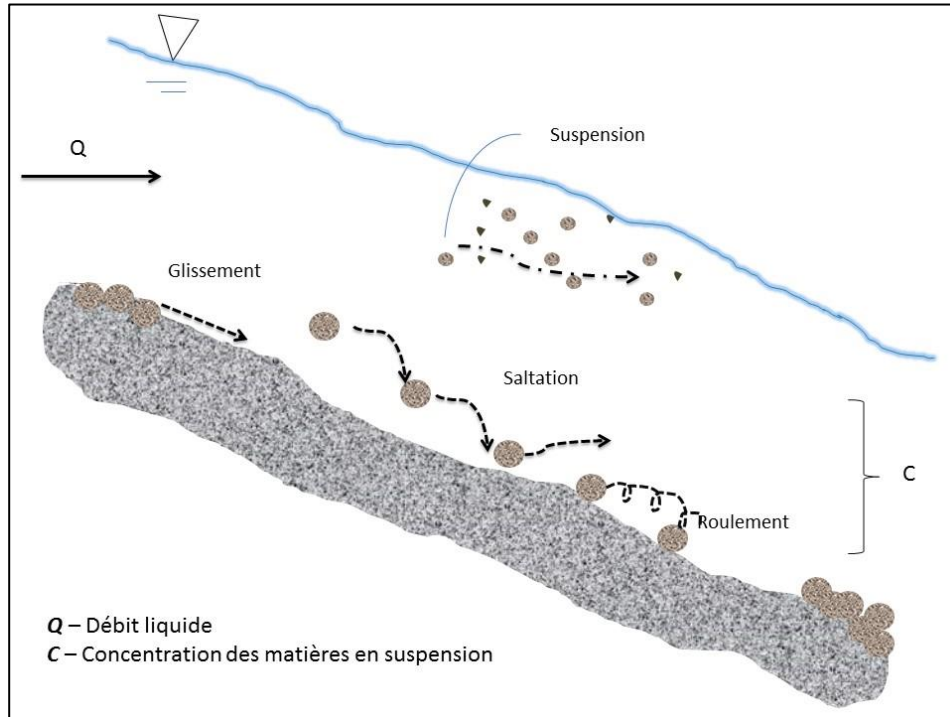
Les sédiments sont des particules de taille supérieure (ils ne peuvent pas passer à travers un tamis de 2  $\mu\text{m}$ ) Lorsque nous nous référons au flux sédimentaire, nous considérons ces composants transportés en suspension et en charriage (au fond). La mesure du flux solide d'une rivière porte généralement sur les matières transportées en suspension et par charriage, qui traversent une section donnée de la rivière dans une unité de temps [Pişota et Zaharia, 2006].

### **6.2.1. Aspects théoriques généraux sur les transports par charriage et en suspension**

Le charriage est le transport des matériaux à proximité du fond, dès que les conditions hydrodynamiques sont suffisantes. Il se caractérise par différents types de déplacements sur le fond de la



rivière : glissement, roulement, ou petits sauts (saltation) (**Figure VI.2**). L'effet des forces agissant sur le transport des grains est différent selon la granulométrie.

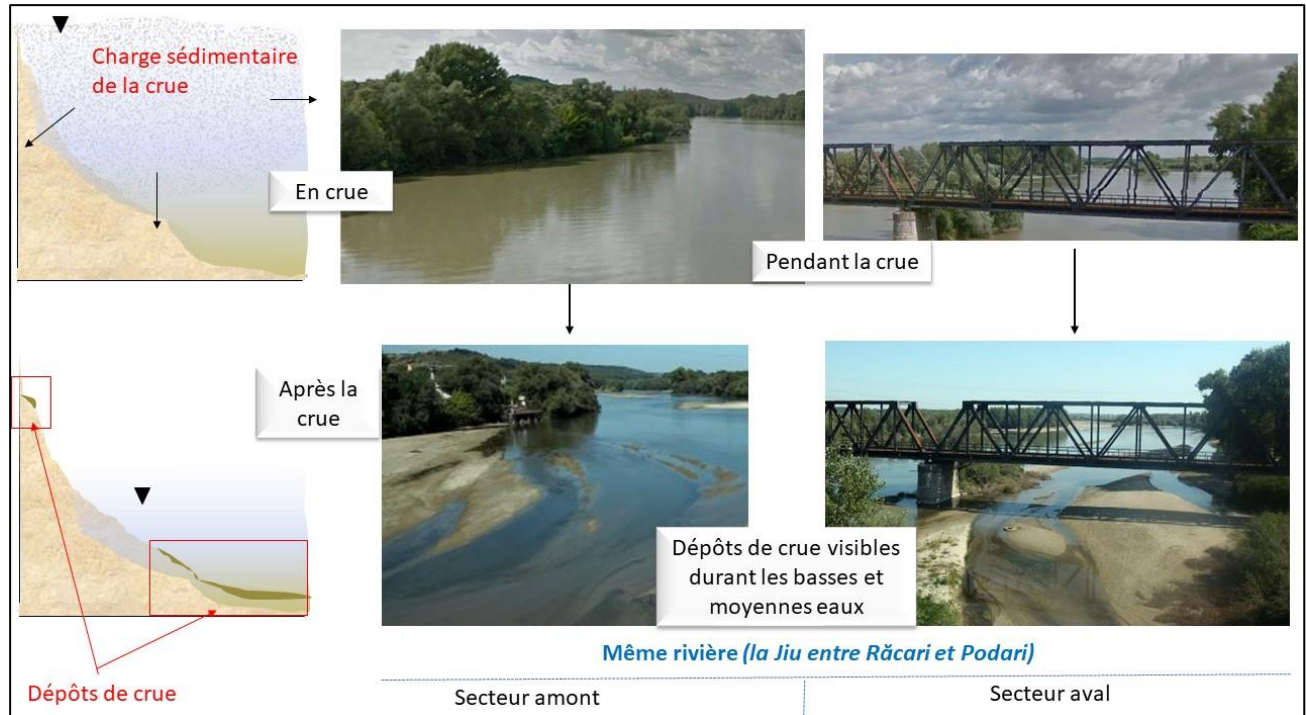


**Figure VI.2.** Modes de transport des sédiments dans une rivière (adapté selon Graf, 1998; et Germain, 2013)

Ces forces sont d'une part le poids des particules et d'autre part toutes les forces d'origine hydrodynamique que l'on peut résumer par l'effet la vitesse d'écoulement de l'eau. Pour une vitesse faible, les granules restent en repos. À des vitesses un peu plus élevées, les particules solides se déplaceront au fond du lit en roulant, en glissant ou en sautant en fonction de leur dimension (la granulométrie). Tous ces mouvements s'inscrivent dans *le charriage*, qui caractérise les particules les plus grossières et les plus lourdes et qui affecte les particules plus massives qui se déplacent lentement en contact permanent avec le fond du chenal, de manière discontinue, voir difficilement prédictible. Quelle que soit la taille des particules, celles-ci se déplaceront au fond du lit avec une vitesse inférieure à celle du courant d'eau. Le transfert de l'amont vers l'aval se fait très progressivement à l'occasion des crues et les matériaux se déplacent avec parfois de longues périodes de stockage et d'immobilité dans le lit.

Pour des vitesses plus élevées et uniquement pour les petites particules (typiquement <1 mm, ce qui englobe le sable, le limon et les argiles), l'agitation turbulente est plus notable et les sédiments se déplacent en suspension à une vitesse équivalente à celle de l'eau. La mise des petits grains en suspension tend à produire une concentration en équilibre avec les conditions hydrodynamiques locale [Camenen, 2014]. Les sédiments en suspension dans la veine fluide en aval au moment de la crue proviennent, pour partie, des sédiments fins dans le lit en amont, mais aussi (principalement) des versants, générés par le ruissellement et amenés dans la rivière dans la rivière à la célérité de l'écoulement. Ce sont ces sédiments dans la partie supérieure de la veine fluide qui sont déposés dans le lit majeur lors des inondations.

La concentration en suspension est d'autant plus élevée (à l'équilibre) que l'agitation turbulente est forte. Quand cette agitation diminue, les sédiments en suspension peuvent se déposer et ils seront remobilisés lors des événements hydrologiques à des plus fortes vitesses (**Figure VI.3**).

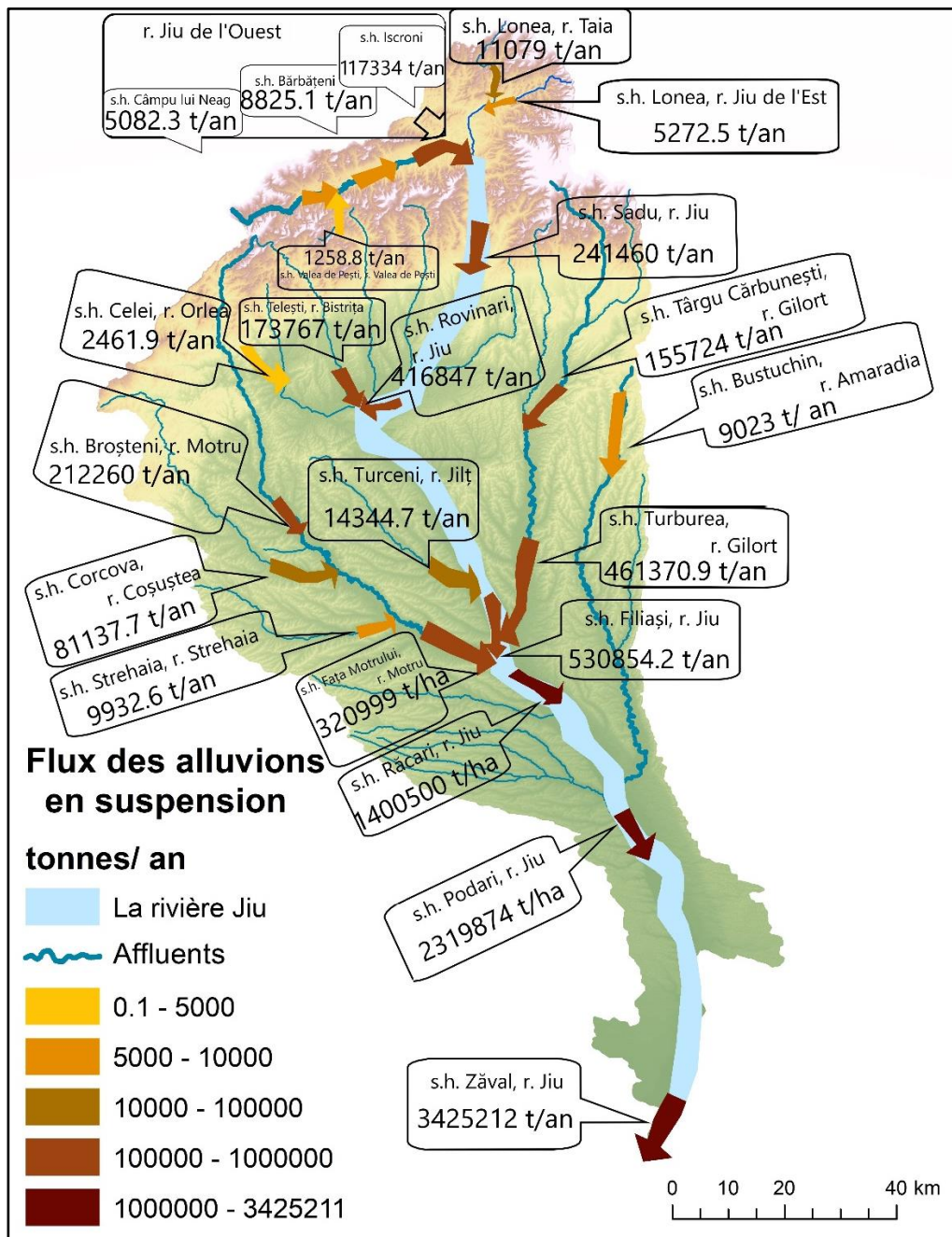


**Figure VI.3.** Schéma de sédimentation (sources des photographies : Google Earth et Moroșanu, 2017)

La distinction entre le transport par charriage et en suspension pour des mêmes paramètres d'écoulement liquide dépend de la taille et de la densité des particules. Le transport des sédiments de l'amont en aval avec une certaine capacité de transport est une fonction d'équilibre hydromorphologique. Si la capacité de transport ne correspond pas avec l'apport en sédiments de l'amont, il va y avoir de l'érosion et du dépôt dans la rivière (échanges lit – berge – matériaux en transport). La plupart des temps, dans un tronçon de rivière, l'action contraire entre ces deux processus, érosion et dépôt, contribue de manière continue au budget sédimentaire et à la dynamique du lit.

Dans le chapitre §5.3.1 nous avons calculé et analysé le débit moyen annuel des alluvions en suspension aux 22 stations hydrométriques avec de mesures des débits solides dans le bassin de la rivière Jiu. La quantité de sédiments en suspension à chaque station peut servir au calcul du flux total des alluvions en suspension apporté par chaque bassin versant, pour ensuite estimer le flux total à l'embouchure avec le fleuve Danube. Nous avons essayé de représenter l'effluence alluvionnaire (le flux des alluvions en suspension provenu de chaque sous bassin), en utilisant le taux d'alluvions annuel des stations hydrométriques avec des mesures de débit solide. Lorsqu'on essaie de réaliser un bilan des flux de matières en suspension, on est souvent confronté au problème du transfert de cette matière de l'amont en aval et de la somme des flux entrants (les affluents et la rivière principale dans le secteur amont), qui n'est pas du même ordre de grandeur avec le flux de l'émissaire à la sortie du bassin versant. Nous faisons appel à l'exemple de l'effluence sédimentaire de la rivière Jiu, où

plusieurs situations de manque de concordance entre les flux sédimentaires entrants et celui sortant sont évidents (**Figure VI.4**). Un simple calcul entre les différentes paires de stations (amont – aval) montre qu’une quantité importante de sédiments en suspension aux stations en amont n’assure pas un flux important immédiatement en aval et vice versa. Nous allons reprendre un exercice similaire au chapitre §7.1.



**Figure VI.4.** L’effluence sédimentaire (flux des alluvions en suspensions) aux stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu ( $W_{\text{annuel.2001} - 2010}$ , t/an)

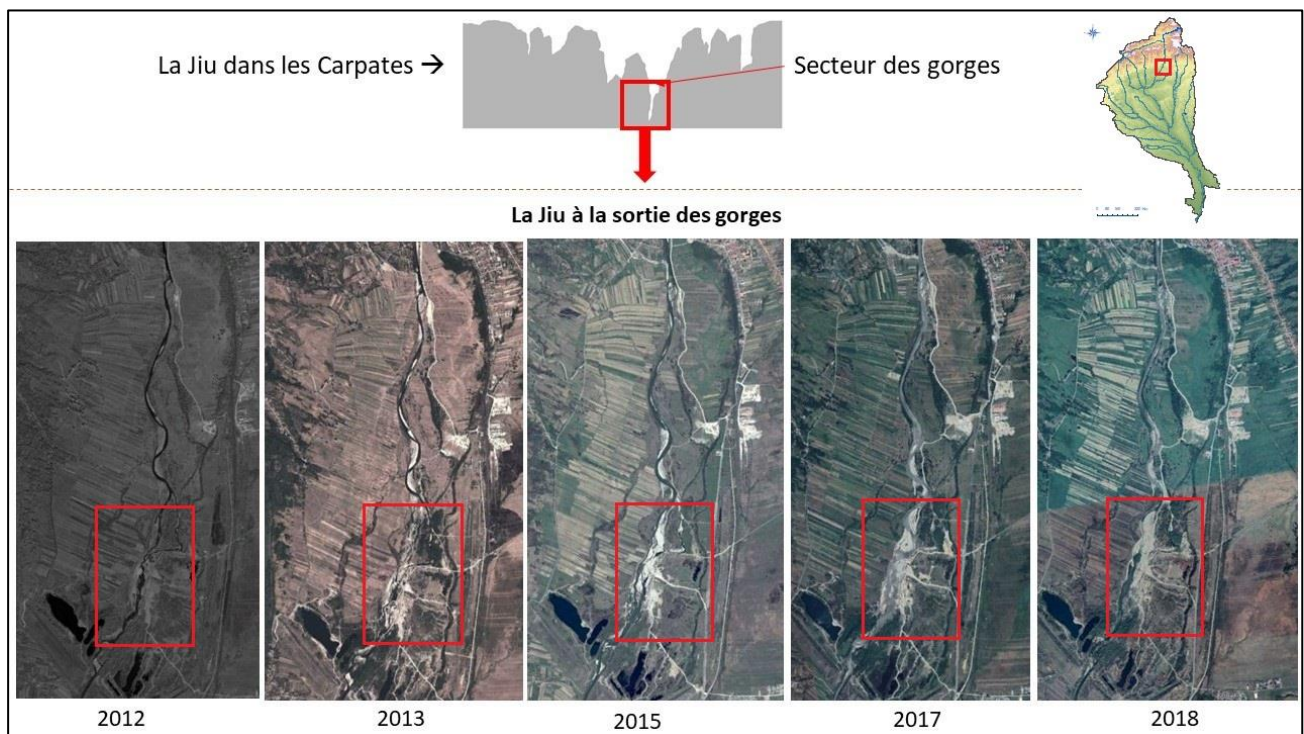
La difficulté de réaliser un bilan sédimentaire est en grande partie due aux processus hydro-morphologiques qui affectent le flux sédimentaire entre un secteur et l’autre ou entre une rivière et son émissaire. Tant en suspension qu’en charriage, les sédiments ne sont pas véhiculés de manière continue et n’assurent pas une relation interrompue entre l’amont et l’aval, comme le flux liquide. Ce sont les processus



d'accumulation, érosion et remobilisation des sédiments dans les vallées (y comprenant les lits et la connectivité latérale entre le lit mineur et les versants en tant que sources de sédiments) qui freinent ou accélèrent l'apport des sédiments entre les différents secteurs d'un bassin versant. Reproduire un bilan ou budget sédimentaire est, ainsi, beaucoup plus difficile que le flux liquide. Que ce soit le charriage ou le transport des sédiments en suspension, le déséquilibre peut donc se produire, dans le cas des stockages et déstockages à différentes échelles de temps: a) à l'échelle de la crue qui avec érosion, transport par l'aval et dépôt des sédiments dans le lit majeure au moment des débordements ou sur les bancs à la décrue ; (b) à l'échelle pluriannuelle : c'est le résultat moyen de l'ensemble des processus et qui forme la morphologie du lit de la rivière et à très long terme de la vallée.

Spatialement, les changements des flux et bilans sédimentaires sont liés aux facteurs naturels et anthropiques qui les contrôlent. Pour illustrer séparément le comportement du charriage et le comportement de la suspension en crue on va se présenter deux exemples issus de l'étude de la rivière Jiu.

Dans le cas du bassin de la rivière Jiu, le transport sédimentaire dans son secteur montagneux (avec de pentes et des rochers durs) est dominé par le charriage ; au secteur subcarpatique correspond une zone de transition caractérisée par le dépôt des sédiments grossiers, tandis que ceux fins se déplacent vers l'aval, dans les régions de piémont et de plaine. Le long de la rivière Jiu, un tel secteur d'équilibre et déséquilibre sédimentaire se trouve aval du secteur de gorges (*Figure VI.5*), où la rivière a été aménagée, et la grande majorité des cours d'eau présente un important déficit en transport solide (notamment par charriage).

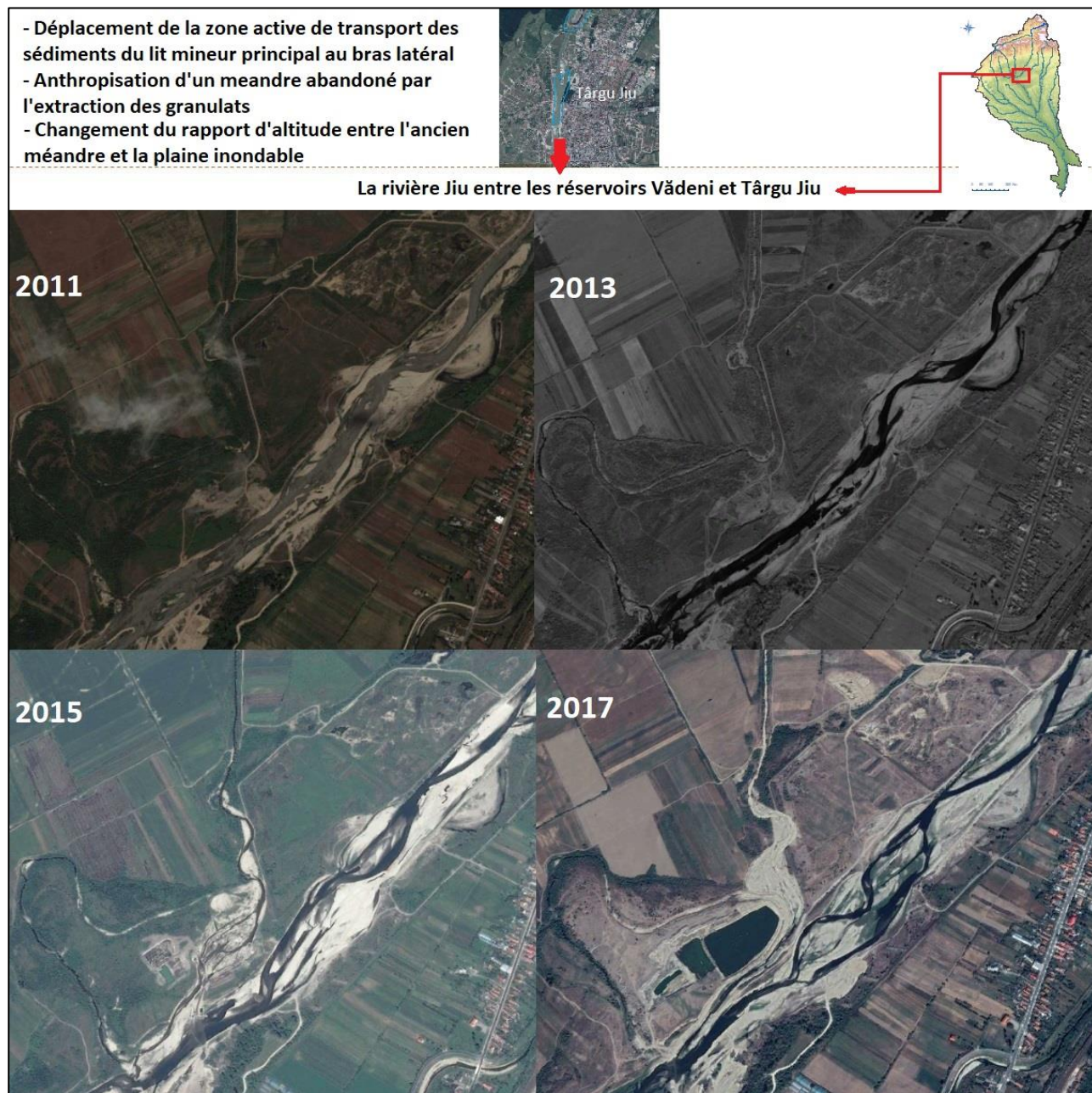


**Figure VI.5.** Sortie des gorges – Târgu Jiu : Secteur de réglage entre l'équilibre et le déséquilibre sédimentaire de la rivière Jiu (à observer la dynamique des dépôt alluviaux le long du secteur aval des gorges)

En même temps, en aval du secteur de gorges, le transport en suspension augmente, grâce au substrat plus érosif des versants et des berges, mais les grands réservoirs aménagés 20 km en aval arrêtent la plupart des

sédiments. Plus en aval, la rivière Jiu est en déficit de sédiments, ce qui entraîne une modification du style fluvial (passage d'un chenal en tresses vers un chenal à méandres). Sur le secteur des réservoirs en construction la Jiu apporte une quantité importante de sédiments qui s'accumulent peu à peu. Plus localement, un obstacle peut perturber la capacité de transport. Par exemple l'entrave du transport solide par une retenue d'eau entraîne un déficit du flux solide qui est alors compensé par une érosion accrue à l'aval et par un enfoncement du lit.

En aval de Târgu Jiu et de ce secteur de réservoirs, le déficit de transport solide a pour conséquence un enfoncement des cours d'eau qui équilibre le manque de sédiments en érodant leur lit (*Figure VI.6*).



**Figure VI.6.** Le secteur Târgu Jiu – Rovinari, immédiatement en aval des réservoirs Târgu Jiu et Vădeni. Dans cette courte période entre la première prise de vue et la dernière (6 ans), la Jiu a une dynamique assez importante, marquée par une diminution des matières en suspension déposées dans le lit mineur (source des images : Google Earth)



Au cours du temps, le lit méandré de la rivière Jiu entre Târgu Jiu et Rovinari a changé de largeur par une baisse continue de quantité d'alluvions apportées de l'amont. La dynamique naturelle du lit mineur est accompagnée par des travaux d'extractions de granulats et le fonctionnement d'un bassin de retenue.

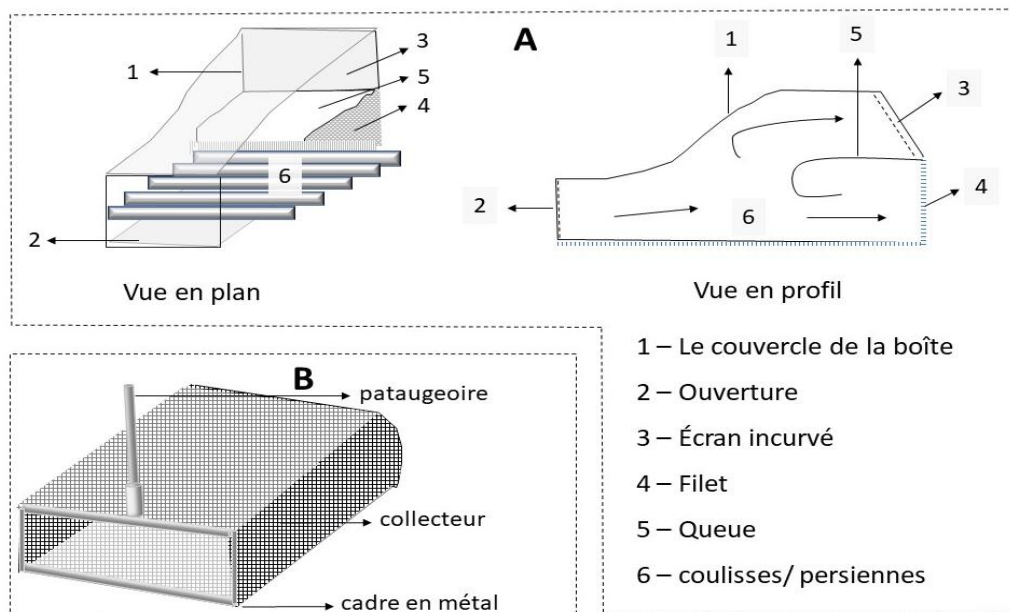
## 6.2.2. Quelle approche pour l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire ?

Nous avons vu dans le chapitre §5.3 à quel point l'analyse des sédiments transportés par les rivières est complexe et pourquoi leur connaissance est importante. Nous nous proposons ici d'argumenter le choix qu'on a fait entre l'étude du transport par charriage et en suspension, en tenant compte de tous les aspects qui soulignent les défis de l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire sous ces deux formes présentées au §6.1. À ces considérations théoriques, on peut aussi ajouter certaines limitations pratiques :

1. Seulement une partie des stations hydrométriques subordonnées à l'ANAR bénéficient des séries de mesures des matières solides en suspension complètes et par charriage (occasionnellement) ;
2. Ces données sont difficilement exploitables pour notre recherche car :
  - le nombre de stations où sont réalisées ces mesures est insuffisant ;
  - les mesures sont incomplètes et ne concernent pas tous les événements de crue ;
  - les données sont difficilement accessibles, voir inaccessibles.

Pour les stations hydrométriques qui en disposent, les observations et les données sont obtenues comme suit [INHGA, 2013]:

- Échantillonnage "unique" de matières en suspension et mesures "complètes", ou "simplifiées" des alluvions en suspension (pour plus de détails sur les dispositifs et protocole de mesure, se rappeler le §5.1.3.) ;
- Mesures des sédiments transportés par charriage avec les échantillons prélevés avec les batomètres, dont « le batomètre piège » (ISCH) et « le batomètre écran » (**Figure VI.7**) sont les plus utilisés en Roumanie.



**Figure VI.7.** Les deux types de batomètres (piège vs. écran) utilisés en Roumanie pour la mesure des sédiments transportés par charriage. A – Batometre piège (capcane) ; B – Batometre écran (Refait d'après Le Manuel d'Hydrométrie de l'Institut National d'Hydrologie)

Malgré l'existence d'instructions spécifiques pour la mesure des sédiments du fond des rivières, il y a très peu de stations hydrométriques en Roumanie où ce type de mesure se réalise et celles qui existent ne couvrent pas la totalité des événements hydrologiques qui pourraient influencer le transport des particules de granulométrie différente. Les alluvions qui forment le fond des lits ont des dimensions très variables d'un endroit à l'autre, aussi bien dans le profil transversal que surtout dans le sens longitudinal [Zăvoianu, 2006].

En l'absence des données sur le transport par charriage et vu les difficultés d'avoir de longues séries de données sur les débits d'alluvions en suspension, nous n'avons pas étudié la variabilité temporelle et spatiale des sédiments en suspension. Par contre, nous avons essayé d'étudier les effets de la dynamique des alluvions en suspension à partir des sédiments accumulés dans le lit majeur, sur les berges, dans la partie inférieure du bassin versant, lors des crues. Nous allons en conséquence nous intéresser à une question plus précise : **les sédiments déposés à l'aval lors des crues reproduisent-ils certains aspects de la dynamique spatio-temporelle du transfert dans le bassin ?**

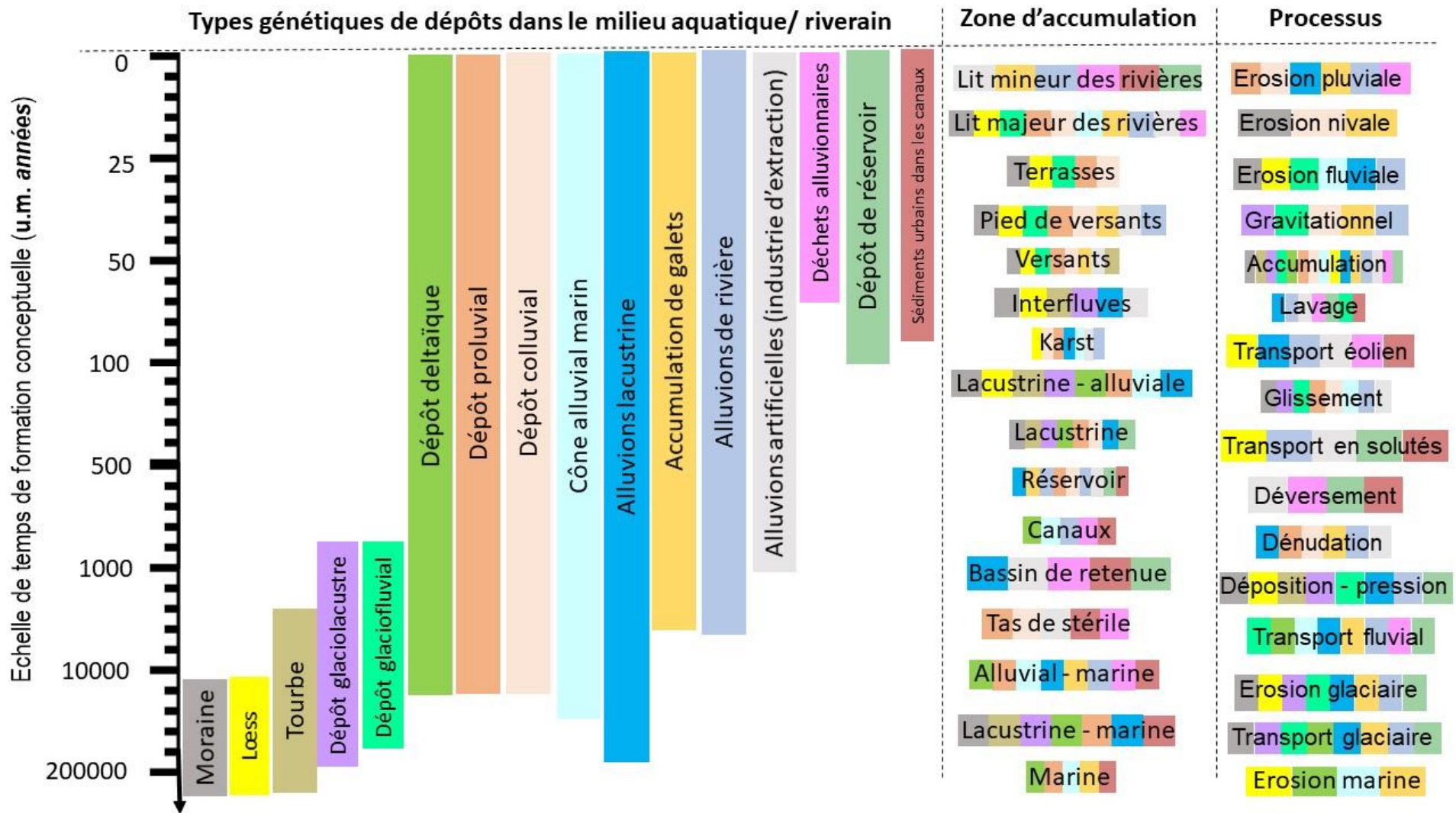
La composition minéralogique des sédiments déposés par une crue dépend de l'origine de ces sédiments qui constituent une couche sédimentaire dans les dépôts du lit majeur. La succession des couches sédimentaires forme une archive des événements passés. De plus, nous avons déjà vu dans les chapitres §3 et §4 que le charbon de différentes types est un traceur caractéristique que nous retrouvons dans les dépôts fluviaux, considéré comme une archive sédimentaire. En essayant de répondre aux questions d'échelles de temps ainsi que des sources et transferts de sédiments, nous avons focalisé notre recherche sur un dépôt d'alluvions fines sur une berge du secteur inférieur de la rivière Jiu (en aval de la ville de Craiova).

### ***6.3. Démarche : analyse d'une archive sédimentaire récente***

Etant donné les données sur les flux sédimentaires insuffisantes et la difficulté de les obtenir, nous avons choisi de valoriser les informations issues de l'analyse d'une archive sédimentaire.

#### **6.3.1. L'archive sédimentaire – c'est quoi ?**

La démarche que nous avons suivie ressemble à celle des géologues et géomorphologues qui analysent les archives sédimentaires pour reconstruire les événements du passé. Dans ces disciplines, la carotte sédimentaire est l'instrument principal pour déduire, à partir des couches composantes les événements passés, sous quelles conditions climatiques et paléo-hydrologiques les sédiments se sont déposés. De bonnes archives sédimentaires peuvent être trouvées dans un lac, au fond de la mer et dans toute zone d'accumulation si cela offre des informations sur les apports/ transferts de sédiments. Il existe de nombreux travaux dans la bibliographie qui concernent les dépôts lacustres [Rădoane *et colab.*, (1998, 2004, 2005, 2016)], fluviaux [Wilhelm, 2019], fluvio-lagunaires [Cayer, 2013]. Toutefois ils concernent une échelle de temps longue et d'autres processus associés. Les environnements de dépôts et d'accumulation alluviaux sont très variés, depuis la base des glaciers jusqu'aux colluvions de pentes et de piémont, en passant par les dépôts de loess, les stocks sédimentaires riverains, les sédiments lacustres, les dépôts marins et deltaïques, jusqu'aux véritables sédiments fins provenant de déchets industriels, de matériaux urbains et des secteurs amont des réservoirs (*Figure VI.8*).



**Figure VI.8.** Échelles de temps associées aux dépôts alluviaux

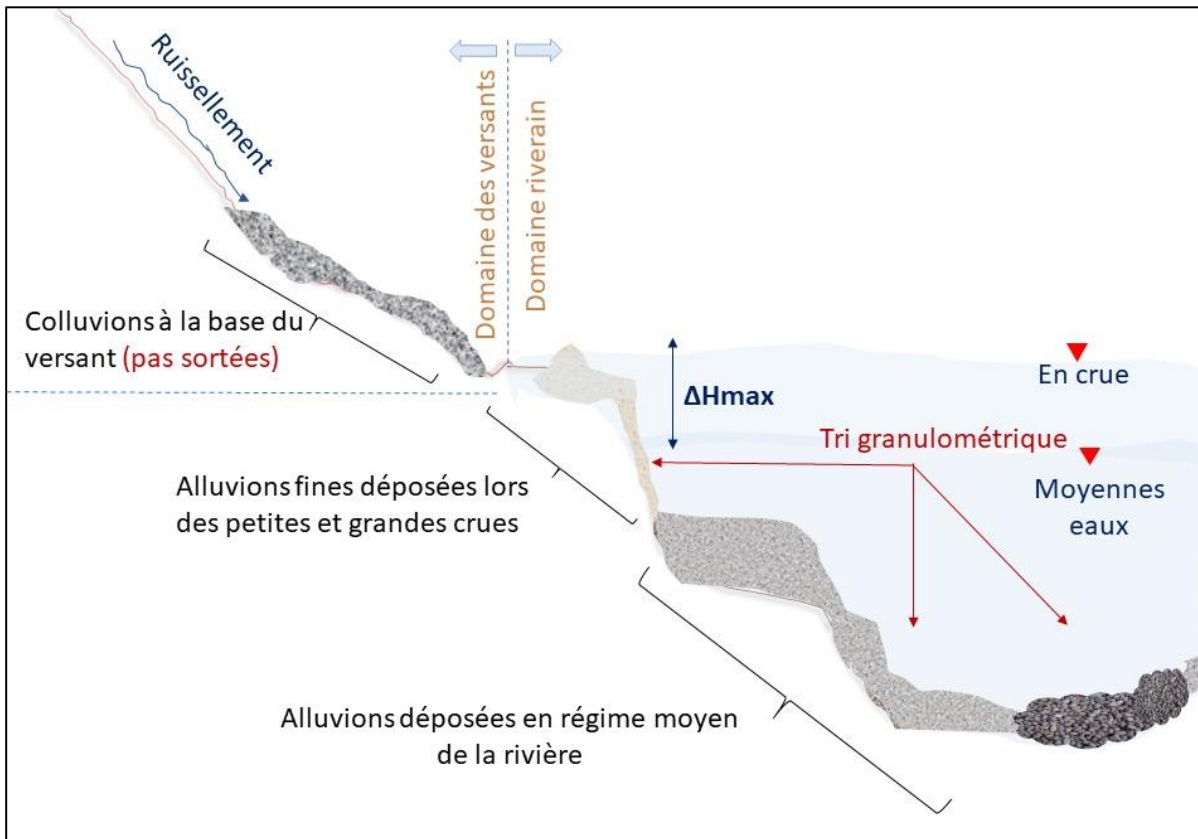
Les échelles de temps associées à la formation de dépôts de sédiments liés aux environnements fluviaux (ou les atteignant tôt ou tard par différents processus) ont également une longue durée, allant du Pléistocène moyen à l'holocène et à l'anthropocène.

Comme celle exploitée par [Jégou \(2005\)](#), notre archive sédimentaire est cependant plus récente, datant de quelques dizaines d'années seulement (voir §8.3).

Avant de progresser dans cette démarche, on prévient le lecteur que nous allons faire quelques abus de langage comme c'est déjà le cas avec l'utilisation du terme d'"*archives sédimentaires*" pour étudier la succession de sédiments récents (quelques dizaines d'années), recouvrant la roche sous-jacente et représentant des agrégats de sédiments plus au moins lâches, non consolidés (non cimentés) qui ont été érodés, transportés et déposés dans un cadre non marin.

Le terme "*alluvions*" n'est pas employé couramment dans les situations où la formation des sédiments peut clairement être attribuée à un processus géologique effectué sur une période beaucoup plus longue que celle de quelques jours à quelques siècles. Nous n'utiliserons pas ici les caractéristiques géologiques du secteur de dépôt pour justifier l'approche, mais plutôt les implications géomorphologiques et hydrologiques, ce qui tient de l'échelle de temps plus proche du présent. Généralement, le terme « alluvial » est associé à une multitude de formes sédimentaires : alluvions, cônes, digues, sols, remblais, méandres, rivages, barrages, chenaux, bancs, aires de trafic, plaines, rivières, talus et terrasses [[Goodie, 2003](#) ; [Jackson et al., 2005](#)]. Souvent, on confond les *alluvions* avec les *colluvions*, qui représentent dans beaucoup de cas le devenir du même matériel avec la même origine qui subit des transformations et se soumet à des agents de transport différents. Les colluvions désignent génériquement des sédiments meubles non consolidés qui se sont déposés à la base de pentes par un lavage de pluie, un lavage en profondeur, une coulée de versant ou une combinaison de ces processus [[Goodie, 2003](#)]. Les colluvions deviennent souvent des sources de sédiments pour les rivières et se transforment ainsi en alluvions une fois l'érosion fluviale entre en action à la base des pentes, sur les terrasses (les affluents ou une rivière en crue) ou dans les lits des rivières (en période des moyennes eaux). Les colluvions sont généralement composées d'une gamme hétérogène de types de roches et de sédiments allant du limon à des fragments de roches de différentes tailles. Les alluvions sont généralement caractérisées par un tri mécanique qui a le rôle de séparer les éléments transportés par charriage ou suspension en fonction de la taille des grains/ particules [[Dictionnaire Larousse](#)]. On utilise également le terme « colluvion » pour désigner spécifiquement les sédiments déposés à la base d'un versant par ruissellement non concentré ou érosion en nappe [[Parry, 2011](#)], lorsque les alluvions sont exclusivement entraînées par les rivières [[Encyclopédie Britannique](#)].

Le plus souvent, les colluvions sont associées au ruissèlement sur les pentes, tandis que les alluvions sont entraînées par les rivières (lorsqu'elles atteignent le lit mineur) ou par le débordement en crue. Rarement les colluvions se déposent au même niveau d'une vallée où les alluvions sont accumulées. Dans la plupart des cas, on peut distinguer les alluvions longeant le lit mineur ou construisant les berges de la rivière, tandis que les colluvions s'arrêtent sur la terrasse des rivières plus développées ou au point de jonction entre la pente et le lit mineur / majeur, sur les rivières à vallées étroites (**Figure VI.9**). On note sur ce point que c'est souvent le cas lorsque les colluvions et les alluvions sont confondus et ils semblent interchangeable malgré les différences.



**Figure VI.9.** Colluvions vs. Alluvions. Définition schématisée

L'érosion ou le déplacement en masse des matériaux sédimentaires sur les pentes génèrent deux types d'accumulations uniques du point de vue processuel et compositionnel. Cependant, la description de ces sédiments comme étant des colluvions ou des alluvions dépend des définitions utilisées, qui peuvent varier selon les scientifiques de la Terre. C'est pourquoi nous nous excusons pour toute utilisation non-conforme des termes "alluvionnaire" et "alluvions" lors de toute référence à l'accumulation ou aux zones sources des sédiments de la rivière Jiu.

Un autre aspect qui devrait être discuté est comment nous appelons ces accumulations alluviales. Lorsque ce matériau alluvial lâche est déposé ou cimenté dans une formation lithologique, on parle d'un dépôt alluvial. Mais quand il n'est pas encore cimenté et qu'il est toujours sensible à l'érosion fluviale, existe-t-il une manière appropriée de l'appeler ? Car les sédiments formés ou déposés dans un cours d'eau ou une rivière pérenne ne sont généralement pas appelés alluviaux si le processus de transformation en roche n'a pas eu le temps de se manifester.

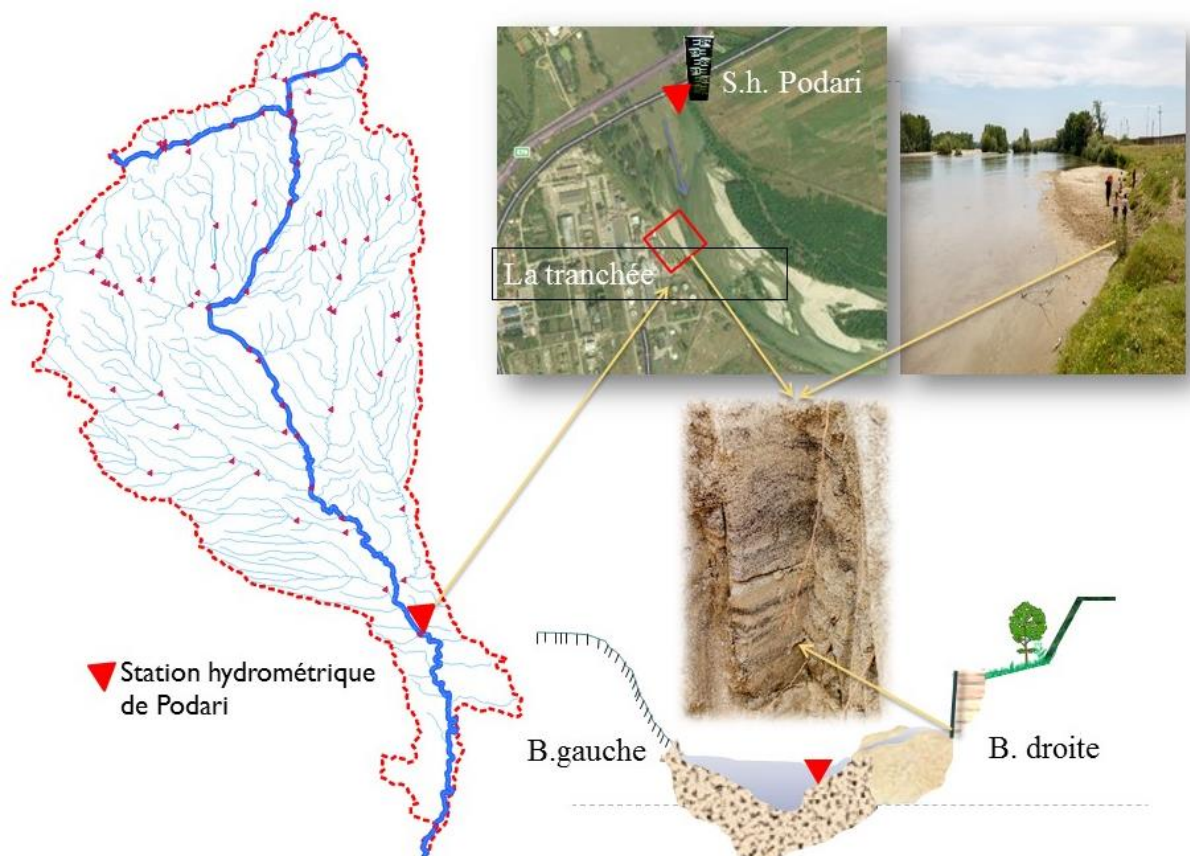
C'est maintenant le bon endroit pour introduire le terme d'"*archive sédimentaire*", même si nous prenons à nouveau le risque cette fois-ci d'être hors de l'échelle de temps y associée. Dans une rivière où nous prenons l'intérêt de trouver les sources d'alluvions récentes, ce sont des dépôts non-consolidés qui datent des années de l'époque industrielle (les années '60 – '90) que nous appelons "*archive sédimentaire*" et nous allons essayer de les relier avec l'historique des crues. Nos références à ce sujet sont le travail de Catherine [Allain-Jégou \(2002\)](#), sur la rivière Isère, affluent principal du Rhône dans les Alpes Françaises.



### 6.3.2. Une archive sédimentaire sur la rivière Jiu

Pour adapter toutes ces approches, qu'on vient de mentionner, à notre objectif visant à caractériser la dynamique spatio-temporelle des sédiments fins dans le bassin de la rivière Jiu, nous avons déduit les processus réagissant sur les sédiments dans leurs zones de production en amont (érosion et mise en mouvement/ transport des sédiments) en recherchant leurs effets en aval (accumulation). La relation de cause à effet entre ces deux parties du cycle de transport des sédiments est due à la modification de la pente de la rivière et aux changements de la granulométrie. Généralement, les sédiments fins peuvent provenir de partout : des secteurs inférieurs des sous-bassins affluents (dans ce cas il s'agit en particulier des dépôts de limon et d'argile), ainsi que des secteurs supérieurs de montagne (avec une granulométrie plus grossière).

**Le site :** Nous avons identifié un endroit d'accumulation des sédiments, en provenant des différents secteurs du bassin, car il est situé dans le secteur inférieur de la rivière Jiu, en aval de la plupart des sources sédimentaires potentielles. Le site correspond à un banc d'accumulation sur la rive droite de la Jiu à Podari (en aval de la station hydrométrique homonyme), avec une succession de différentes couches alluviales plus ou moins horizontales (*Figure VI.10*). Située entre la rivière et une digue construite après l'épisode d'inondation historique de 1972 pour protéger les terres agricoles du village de Podari contre nouveaux débordements, le banc d'accumulation est probablement récent (quelques décennies seulement) et il a certainement été créé par les inondations les plus fortes, capables de transporter de sédiments sur des distances très longues et les déposer en aval.



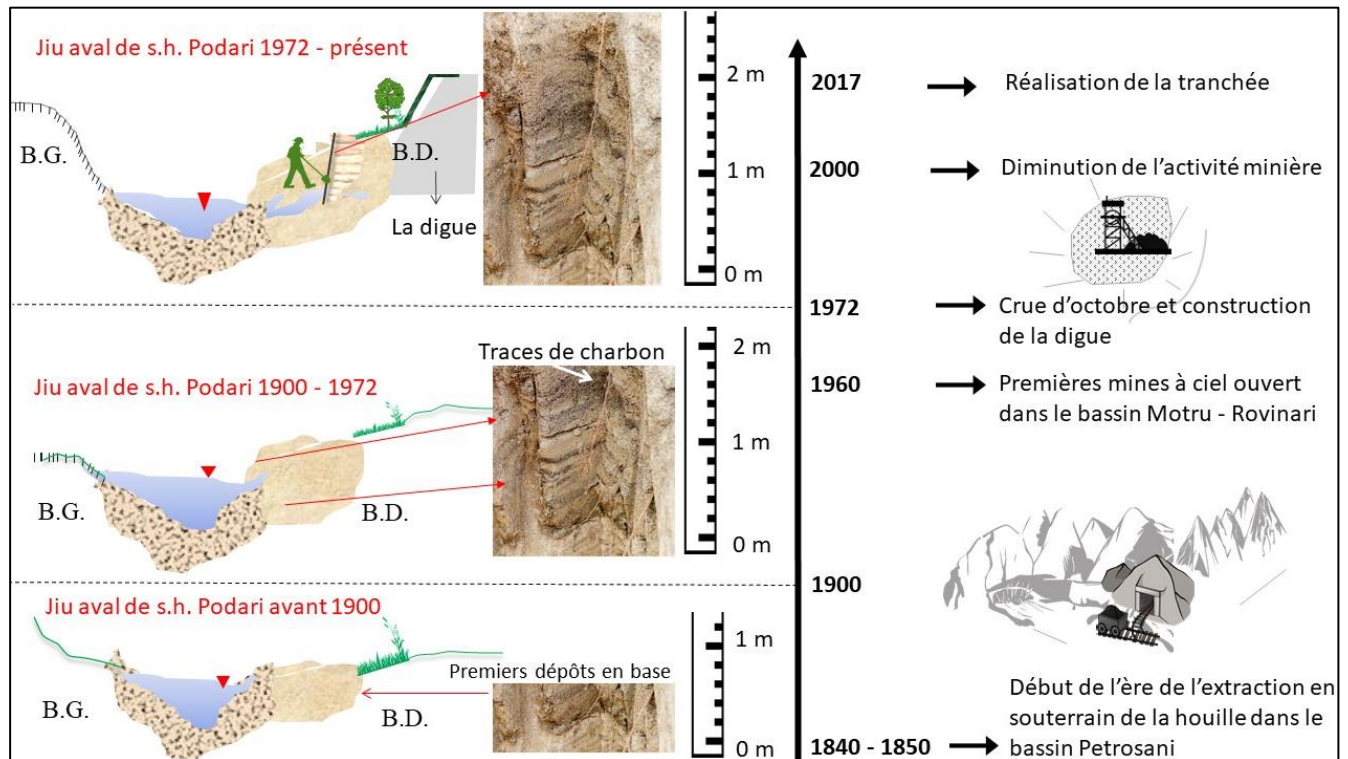
**Figure VI.10.** Localisation de l'archive sédimentaire étudiée (clichés : Moroşanu, 2017 et Busjak, 2017)



Les couches sédimentaires sont le témoin de la magnitude, de la fréquence et de l'origine approximative des crues majeures ayant contribué au transport des sédiments et à l'évolution des formes alluviales. Le dépôt alluvial est formé de différentes couches, qui se distinguent par les couleurs et les épaisseurs différentes (*Figure VI.11*). Celles-ci doivent avoir été déposées lors des crues récentes (quelques dizaines d'années ?) et elles doivent être composées de matériaux de provenances différentes, en fonction des sous-bassins versants les plus contributifs (en termes d'érosion et de capacité de transport des rivières affluents vers la Jiu) lors de chaque crue.

**Figure VI.11.** L'archive alluviale de Podari : des couches avec des caractéristiques différentes (cliché : Morosanu, 2017)

Nous nous placerons dans une période postérieure à l'endiguement de la rivière Jiu (*Figure VI.12*), sans chercher des liaisons avec les changements climatiques (repérage des événements extrêmes, des apports, ou bien la capacité de transport). Nous garderons à l'esprit les différentes activités humaines influençant le transport sédimentaire (industrie du charbon, aménagements hydrotechniques).



**Figure VI.12.** La place du dépôt alluvial de la rivière Jiu, secteur aval, proximité de la s.h. Podari, sur l'échelle de temps

Le début et le développement des activités minières dans les deux bassins de charbon qu'on a présentés dans le chapitre §3.9 (Petroșani dans les Carpates, dont l'extraction de charbon a commencé plus tôt, en 1840 – 1850 ; respectivement Motru – Rovinari dans le piémont, qui a été exploité à partir de 1960) ont constitué des repères temporels dans le transfert sédimentaire durant les crues.

Nous utiliserons à des fins de validation de la chronologie et la spatialisation des sources des matériaux formant le dépôt alluvial les mesures de débits liquides et d'alluvions en suspension à la station hydrométrique de Podari et les résultats de différentes analyses de laboratoires sur les échantillons d'alluvions prélevées du dépôt sédimentaire.

Dans ce contexte, la recherche dans ce dépôt sédimentaire sera organisée autour de trois questions :

*1. D'où viennent ces sédiments ? De tout le bassin versant, de l'érosion sur les versants en amont et des perturbations d'origine anthropique (l'effet des mines de charbon) ? ;*

*2. Comment sont-ils arrivés là ? Par transfert directement de la source ou par dépôt intermédiaire et reprise des sédiments lors des crues suivantes ?*

*3. La construction de la digue après 1972 est-elle antérieure aux premières couches déposées ? Est-ce qu'on a les moyens de trouver l'âge approximative de la base du dépôt ?*

La démarche consiste à analyser les couches déposées et de les relier avec les crues de la Jiu et de ses affluents principaux, ainsi qu'avec les sources possibles en amont. En échantillonnant les couches sédimentaires et en les analysant en laboratoire avec différentes méthodes que nous détaillerons dans les prochains chapitres, nous serons en mesure d'associer les caractéristiques géochimiques à l'origine des sédiments fins. Dans notre étude de cas, un avantage est l'existence de particules de charbon qui peuvent indiquer la source d'une partie des sédiments provenant de deux bassins d'extraction du charbon.

Il a été démontré que l'origine (temporelle et spatiale) des plus grandes quantités de sédiments est liée aux plus fortes crues dans un bassin hydrographique pendant une très courte période de temps. Ces événements hydrologiques extrêmes, qui durent de quelques dizaines d'heures à plusieurs jours, sont les principaux agents contribuant au détachement, au transport et au dépôt de sédiments sur un trajet fluvial allant de l'amont à l'aval. L'analyse d'une archive sédimentaire sera faite en relation avec les processus de dynamique des sédiments.

L'archive sédimentaire correspond à un profil vertical creusé dans l'accumulation de la berge, que nous appelons par la suite "la tranchée". Nous discuterons au chapitre §8 des avantages de cette méthode par rapport à la réalisation d'un carottage. En posant certaines hypothèses, nous allons préciser ci-après les mécanismes de construction des dépôts sur la berge et la validité de la démarche.

### **6.3.3. Mécanismes de dépôt sédimentaire dans le lit majeur**

La texture du dépôt et notamment la granulométrie des sédiments déposés dépend surtout de l'énergie de la masse d'eau et des conditions/ processus géomorphologiques locaux. L'eau en mouvement rapide ne dépose que des matériaux grossiers tels que des roches et du gravier à proximité du fond où elles sont transportées.



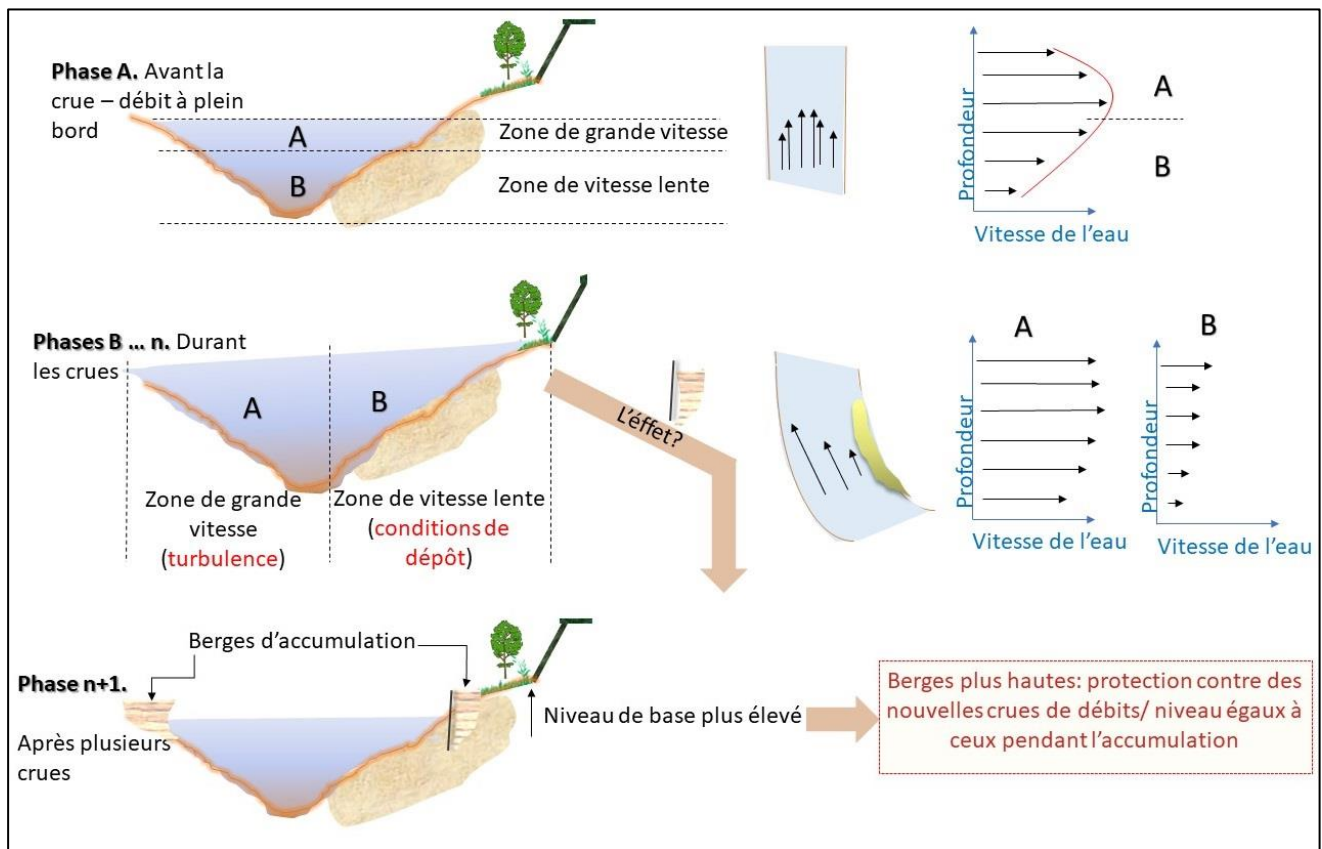
Sur les terrasses et sur les dépôts ne peuvent concerner que des particules transportées en suspension dans la veine fluide. Là où la vitesse de l'eau diminue, ces particules de sable fin se déposent, tandis que des particules encore plus fines (de limon et d'argile) se déposent dans des secteurs eaux à vitesse faible.

Dans les premières sections du chapitre nous avons vu que les matériaux transportés en suspension proviennent de l'érosion en amont, des versants et du lit. Ces matériaux sont transportés principalement par les crues (plus de > 80% de la charge totale de sédiments en suspension survient pendant moins de 50 jours au cours d'une année dans le bassin de la rivière Jiu).

Ils se déposent au moment des crues sur la berge d'accumulation si certaines conditions se réunissent :

- La rivière a débordé et l'eau a envahi la zone de berge. Nous allons nous intéresser aux crues dont le niveau atteint est suffisant pour déborder. Il faut déterminer un débit seuil pour sélectionner les événements à analyser. Bien entendu, comme des dépôts successifs accroissent l'altitude de la berge, ce débit seuil est de plus en plus important.

- La vitesse de la rivière sur la berge inondée est faible, de même que la turbulence. L'écoulement dans la zone de dépôt est suffisamment ralenti pour que les particules en suspension se déposent au sol (faible capacité de transport, favorisant le dépôt d'une partie de la charge en suspension). Ainsi, comme nous l'avons aussi schématisé dans la **Figure VI.13**, il y a deux étapes dans le dépôt des alluvions en crue :



**Figure VI.13.** Conditions de la vitesse de déposition des particules supérieure à leur maintenance en turbulence et la formation de la berge d'accumulation

- La vitesse de chute doit dépasser la turbulence à l'endroit où il y a les dépôts.

- *Le dépôt/l'accumulation* se font pendant et après la décrue, lorsque la vitesse faible de l'eau n'exerce plus une action d'érosion ou de remise en suspension, afin de permettre aux sédiments qui viennent d'être déposés s'en fixer.

### 6.3.4. Hypothèses de l'analyse du dépôt sédimentaire

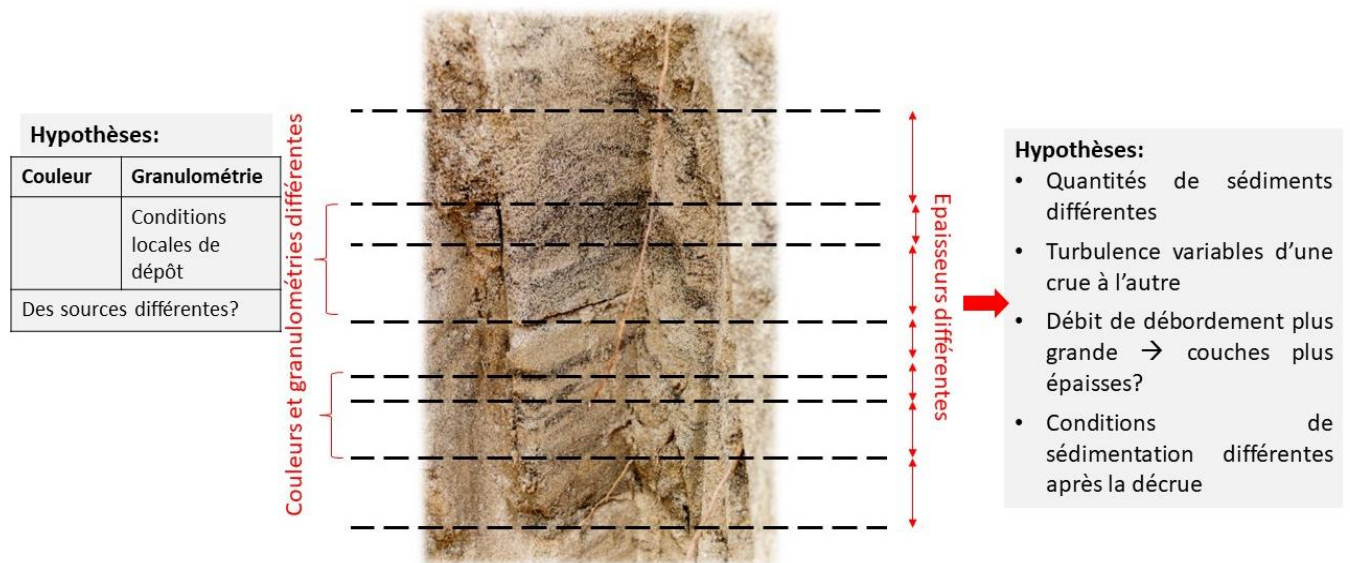
L'analyse de l'archive sédimentaire identifiée sur la rive de la Jiu à Podari repose sur les *hypothèses de nature hydrologiques* et *hydromorphologiques* suivantes :

- ✓ **H1** : Chaque couche alluviale a été déposée lors d'un seul événement d'inondation.
- ✓ **H2** : Les processus d'érosion et de lavage qui ont pu affecter la couche alluviale supérieure, ont été suffisamment réduits pour ne pas être pris en compte.
- ✓ **H3** : L'accumulation sur la berge, formée par les crues débordantes est relativement récente (moins de 30 ans) et stable.

#### 6.3.4.1. H1 : Chaque couche alluviale a été déposée lors d'un seul événement d'inondation

Cette hypothèse suppose que chaque couche de sédiments a été déposée par un seul événement de crue (en quelques jours, principalement pendant le pic du débit correspondant à la hauteur des couches). A titre exceptionnel, dans le cas de plusieurs crues successives, durant une période humide avec des fortes crues, il peut avoir un doute sur cette hypothèse, car il est difficile de séparer chaque événement et d'identifier chaque sous-couche associée. A ce niveau il y a aussi la question de l'épaisseur des couches, qui peut d'une part rendre plus difficile leur différenciation sur le terrain, et d'autre part, qui peut poser de nouvelles questions concernant la relation entre le débit maximal, la durée de la submersion de la berge et le volume des sédiments déposés.

On traite cette hypothèse en considérant encore deux aspects, celui qualitatif et celui quantitatif caractérisant la construction de l'archive sédimentaire en question (*Figure VI.14*).



**Figure VI.14.** Variation des caractéristiques d'une succession de couches sédimentaires en fonction des facteurs quantitatifs et qualitatifs



En ce qui concerne les caractéristiques des sédiments déposés, chaque crue construit une couche différente en granulométrie et composition minéralogique. Nous allons détailler ces caractéristiques dans le chapitre 9.

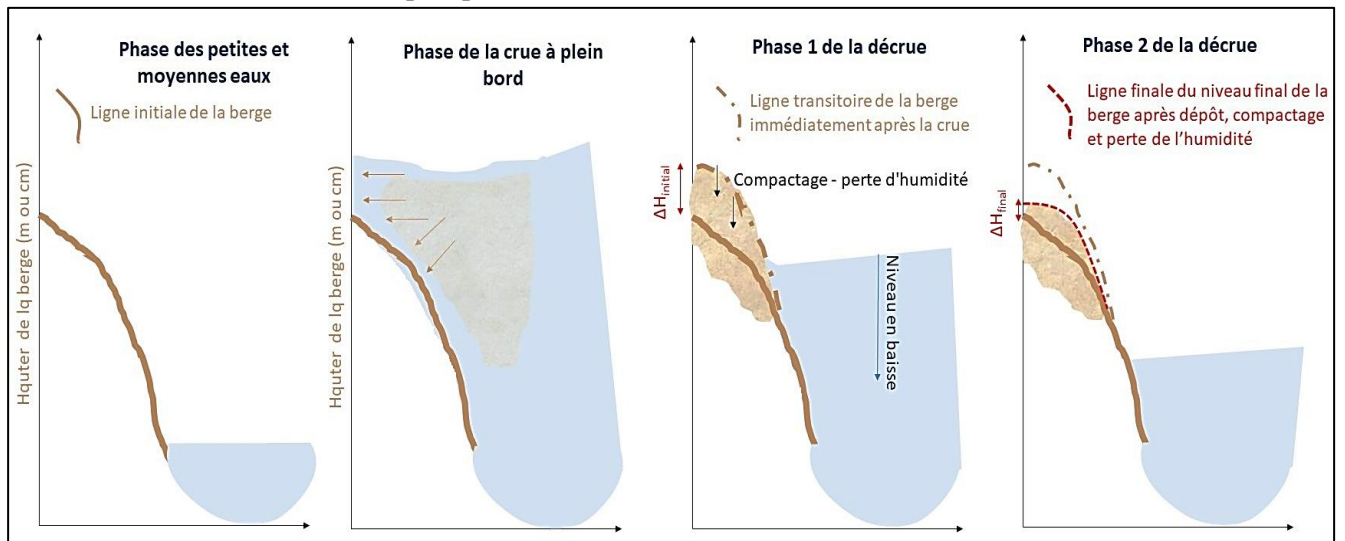
La quantité des sédiments déposés dépend de la concentration des sédiments transportés en suspension des conditions hydrodynamiques et de la turbulence, ainsi que de la granulométrie des sédiments apportés, et enfin de la durée de la crue.

Nous ne disposons pas de mesures fiables et complète des concentrations des sédiments transportés en suspension, ni des caractéristiques des conditions hydrodynamiques des dépôts (qui peuvent varier d'une crue à la l'autre) ; nous ne pourrions donc utiliser l'épaisseur des strates de dépôt que de manière indicative.

#### 6.3.4.2. H2 : Les processus d'érosion de la couche supérieure sont négligeables

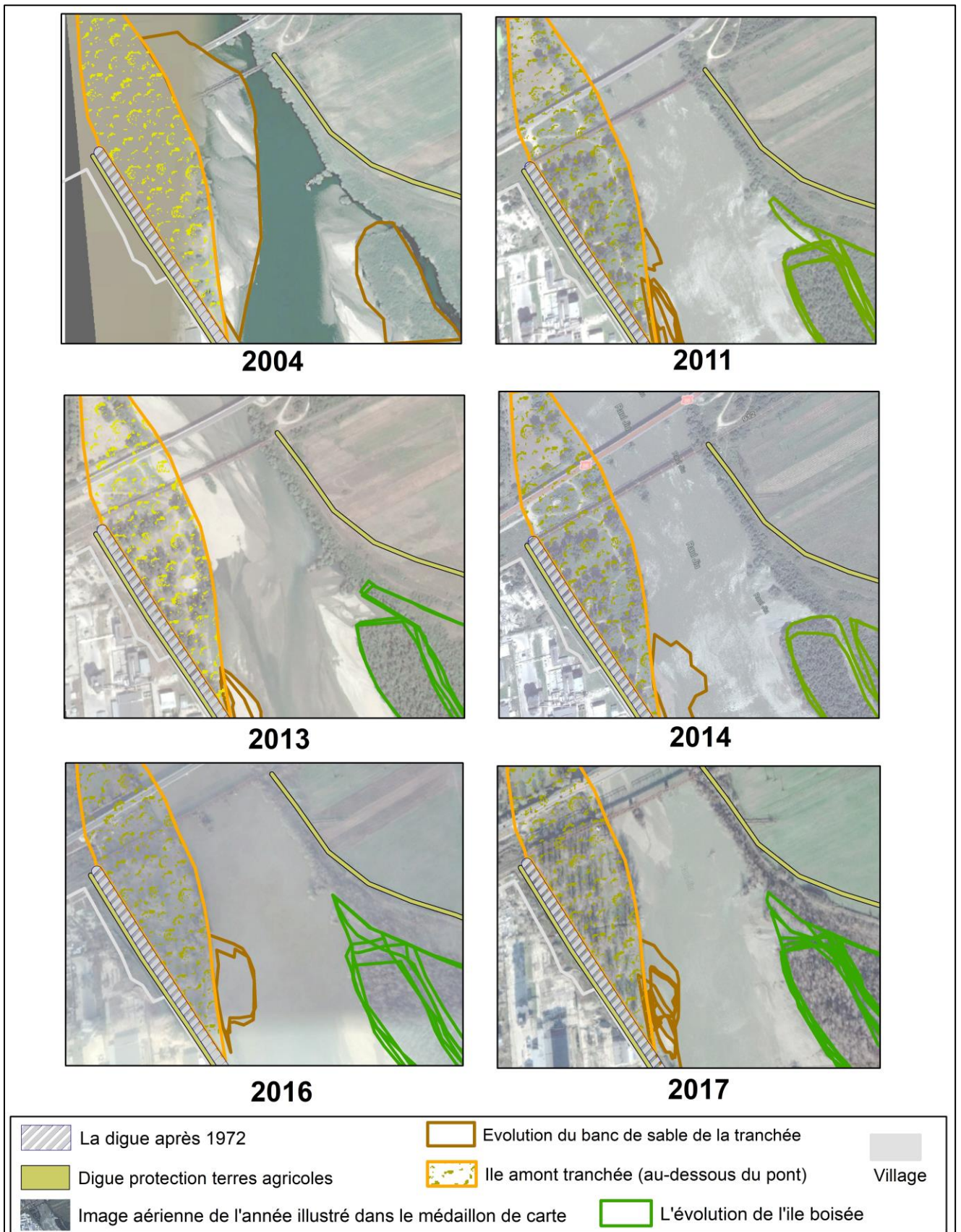
Nous faisons l'hypothèse que la même crue ne peut pas déposer et ensuite enlever les sédiments lors de la décrue. Également, nous supposons que les alluvions une fois déposées et formant les couches actuelles, stabilisés, n'ont pas été remaniées par les crues suivantes. Les alluvions déposées et en cours de compactage, présentent à la fois une forte perméabilité et une faible cohésion, ce qui peut les rendre vulnérables à l'érosion. Pour que les alluvions ne soient pas reprises par les crues suivantes, des observations de conditions de dépôt ont été faites, en considérant les aspects suivants :

##### a. La verticale des dépôts par une crue (Figure VI.15).



**Figure VI.15.** Schématisation de la déformation verticale des dépôts en réponse aux mécanismes de la crue et de la décrue

b. La dynamique latérale de la berge – nous voyons sur les photos aériennes de différentes années une variation de la façade de la rive, qui a subi une alternance de reculs ou avancement, ou accrétion, par rapport au niveau de l'eau et à la géométrie en travers (Figure VI.16 et Tableau VI.1).



**Figure VI.16.** La berge au droit de la tranchée à plusieurs moments dans les dernières années (*Images aériennes géoréférencées*)

**Tableau VI.1.** La succession des images aériennes utilisées pour capter l'évolution de la berge à Podari au droit de la tranchée

Année	Jour du passage satellitaire	Source de l'image
2017	2.01.2017	Google Earth
	20.04.2017	Google Earth
	10.04.2017	Google Earth
	14.06.2017	ArcGIS
	10.12.2017	Google Earth
2016	30.05.2016	Google Earth
	16.08.2016	Google Earth
	23.09.2016	Google Earth
	16.11.2016	Google Earth
2014	30.04.2014	ArcGIS
	7.05.2014	Google Earth
	14.05.2014	ArcGIS
	27.08.2014	Google Earth
	17.09.2014	ArcGIS
	29.10.2014	ArcGIS
2013	30.07.2013	Google Earth
	1.09.2013	Google Earth
2011	25.05.2011	Google Earth
	27.07.2011	Google Earth
2004	7.05.2004	Google Earth

Nous supposons que les nouvelles couches sont en équilibre avec l'écoulement la rivière Jiu à tout moment ultérieur au dépôt, indépendamment de la protection supplémentaire qu'elles auraient pu recevoir de la végétation installée entre deux épisodes de crue débordantes.

#### **6.3.4.3. H3 : L'accumulation sur la berge est récente et stable**

La plupart des études sur les séquences fluviales ont indiqué des périodes de début de la construction de berges anciennes de plus de 100 ans [Jégou, 2002]. Mais dans certains cas, les rivières ont été capables d'élever de manière significative leurs berges en peu de temps (quelques décennies), c'est le travail de Allain Jégou qui a déployé une évolution très rapide d'une barre de sable de l'Isère : en moins de 10 ans, les accumulations de matériaux transportés en suspension dépassent 2 mètres.

Nous verrons au chapitre 8 la construction morphologique de la zone de dépôt choisie dans la présente étude et nous détaillerons sur les pistes que nous avons trouvées pour soutenir l'hypothèse de la construction récente de la berge. En tant que démarche, nous commençons par les couches supérieures, car on est certain qu'elles ont été déposées dans les dernières 20 années (évidences des photos aériennes et des témoignages des locaux). A travers l'analyse hydrologique nous essayerons de relier les différentes couches avec les crues récentes susceptibles de les avoir déposés, pour enfin conclure avec une analyse de datation du niveau inférieur. La **Figure VI.14** qui a été évoquée pour l'hypothèse H2 peut aussi servir à démontrer la stabilité de ces dépôts.

### 6.3.5. Pourquoi on ne peut pas utiliser les sédiments du lit mineur pour ce travail?

Les sédiments qui constituent les dépôts alluviaux que nous analysons dans les secteurs inférieurs des rivières sont issus de deux sources principales : l'érosion des versants et la remise en suspension du matériel sédimentaire du lit. Il est difficile de savoir à quel point et à partir de quelles régions sources les sédiments ont été entraînés, transportés et déposés dans le lit. Il est d'autant plus difficile de connaître à quel moment et sur quelle distance ils seront remis en suspension par l'écoulement turbulent pendant les crues. Seules les caractéristiques générales des sédiments de fond dans certains secteurs des rivières peuvent être connues, étant donnée la capacité de transport des sédiments grossiers diminuée en aval.

Avec l'objectif strictement général d'analyser le contenu géochimique et les caractéristiques physiques des sédiments, nous avons échantillonné à différents endroits du bassin versant, dans les lits mineurs de la rivière Jiu et de ses affluents principaux (§8.4.). Ces sédiments ne sont pas exploitables ici, parce que leur constitution dépend des conditions locales hydromorphologiques, des processus locaux de mise en suspension et de l'endroit précis où l'échantillonnage est exécuté. Ils ne témoignent directement pas de l'histoire d'érosion et transport de l'amont et donc, nous ne pouvons pas les mettre en relation avec les sources sédimentaires.

D'ici résulte *l'hypothèse H4* : *a priori* la majorité des matériaux déposés par les crues proviennent directement des versants érodés lors des crues des sous-bassins amont qui ont contribué à la crue.

### *Synthèse du chapitre*

Le chapitre s'est focalisé sur le choix d'une approche pour l'analyse des dépôts sédimentaires afin de répondre à la question suivante : *les sédiments déposés à l'aval de la rivière par les crues reproduisent-ils certains aspects de la dynamique spatio-temporelle du transfert dans le bassin ?*

La démarche choisie porte sur l'analyse d'une archive sédimentaire récente (préconisée à avoir quelques décennies) correspondante à un dépôt sédimentaire de la rive droite de la rivière Jiu, dans son secteur inférieur (près de la station hydrométrique de Podari).

Nous allons consacrer les chapitres suivants à l'analyse de l'archive sédimentaire de Podari, pour relier ensuite les différentes couches d'alluvions avec les sources spatiales et les échelles temporelles impliquées :

- Au Chapitre 7 nous sélectionnerons les événements de crue qui ont pu fabriquer les dépôts dans le lit majeur à l'aval.
- Au Chapitre 8 nous présenterons le protocole d'échantillonnage des matériaux de la tranchée et nous présenterons les méthodes mises en œuvre au laboratoire pour l'analyse de ces matériaux.
- Au Chapitre 9 nous confirmerons la stratigraphie du dépôt et préciserons les caractéristiques physiques, géochimiques et pétrologiques des différentes couches successives. Nous présenterons aussi les analyses développées pour dater les couches les plus basses (les plus anciennes).
- Enfin au Chapitre 10 nous mettrons en relation les couches successives, les sources potentielles et les crues qui ont transporté ces sédiments.



## Chapitre 7.

# Contributions des sous-bassins versant au ruissellement et au transfert des sédiments fins

<b>7.1. Raisonner à l'échelle des crues</b> .....	320
<b>7.1.1. Rappel des considérants sur la relation crues – dépôts de berges</b> .....	320
<b>7.1.2. Analyse statistique des crues</b> .....	322
<b>7.1.3. Détermination d'un débit seuil de débordement</b> .....	324
7.1.3.1. Exploitation des données techniques de la station hydrométrique .....	325
7.1.3.2. Le débit à plein bords – le bon seuil pour le niveau à déborder ? .....	331
7.1.3.3. Calibrage des modèles HEC-RAS pour le développement des courbes de tarage .....	336
<b>7.1.4. Sélection des crues débordantes</b> .....	340
7.1.4.1. Considérations générales .....	340
7.1.4.2. Sélection des crues débordantes à la base du seuil .....	342
<b>7.2. Jeux de données. Critique</b> .....	346
<b>7.2.1. La cohérence des débits amont – aval</b> .....	346
<b>7.2.2. Validité des données de transport solide</b> .....	349
<b>7.3. Les crues débordantes : de quels sous-bassins ?</b> .....	352
<b>7.3.1. Sélection des stations hydrométriques</b> .....	352
<b>7.3.2. Bases de données. Limites d'exploitation</b> .....	355
<b>7.4. D'où viennent les crues ? Analyse des indices de crues</b> .....	360
<b>7.4.1. Principe d'analyse</b> .....	360
<b>7.4.2. Choix des indices de crue</b> .....	362
<b>7.4.3. Présentation des indices de crue pour l'année 2014</b> .....	365
7.4.3.1. Indices considérant la durée totale de la crue .....	365
7.4.3.1.1. Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence.....	363
7.4.3.1.2. Contribution en volume relatif au volume total amont .....	366
7.4.3.1.3. Lamé d'eau totale ruisselée .....	364
7.4.3.1.4. Contribution en volume relatif au volume total amont (%) pondérée par la superficie du bassin versant .....	368
7.4.3.1.5. Volume de la crue/ volume annuel de la même station .....	371



7.4.3.1.6. <i>Volume de la crue/ volume multiannuel de la même station (dans la période 2002 – 2014)</i> .....	372
7.4.3.1.7. <i>Volume de la crue/ volume des crues de la même station dans la période analysée (2002 – 2014)</i> .....	373
7.4.3.1.8. <i>Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)</i> .....	375
7.4.3.2. <i>Indices considérant la période de débit de pointe comme durée de référence pour le calcul du volume débordant</i> .....	377
7.4.3.2.1. <i>Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence</i> .....	377
7.4.3.2.2. <i>Contribution en volume relatif au volume total amont (%)</i> .....	378
7.4.3.2.3. <i>Lame d'eau totale ruisselée (mm)</i> .....	379
7.4.3.2.4. <i>Volume de la crue/ volume annuel de la même station</i> .....	380
7.4.3.2.5. <i>Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)</i> .....	381
<b>7.4.4. Discussion sur les indices de crue</b> .....	<b>383</b>
7.4.4.1. Critères d'évaluation des indices de crue .....	383
7.4.4.2. Considération sur la pertinence des indices .....	385
7.4.4.3. Synthèse des indices appliqués sur toutes les 27 crues analysées .....	387

## 7.1. Raisonner à l'échelle des crues

Dans ce chapitre, nous allons tester une hypothèse, en cherchant les crues qui ont contribué à la production sédimentaire. L'échelle de temps est plus courte, étant donné les résultats du chapitre §5 en termes de la participation des crues à l'export sédimentaire total durant l'année, ainsi que les considérations du chapitre §6 en ce qui concerne la composante du flux solide envisagée (les matières en suspension). Nous allons ainsi analyser des épisodes de crue potentiellement liés aux phases les plus intenses du transfert sédimentaire, nous allons présenter la démarche de sélection des crues et nous allons les caractériser du point de vue des sous-bassins versants où elles ont été les plus fortes. Dans le chapitre précédent (§6), nous nous sommes positionnés dans la recherche des crues par rapport à l'effet direct du transport des matières qu'elles font, les dépôts alluvionnaires. Nous avons trouvé un endroit de dépôt où nous avons distingué différentes couches d'alluvions, provenant typiquement de différentes crues (dont les caractéristiques on va détailler dans le chapitre §9) et nous cherchons maintenant les crues qui les ont construites.

### 7.1.1. Rappel des considérants sur la relation crues – dépôts de berges

La construction naturelle des berges par des dépôts successifs de sédiments se fait lors des plus grandes crues qui débordent dans le lit majeur. Afin d'identifier le seuil de débordement, la question se pose autour de la relation niveau-débit. Les incertitudes liées à cette relation ne sont pas à négliger et on a essayé de les réduire autant que possible. L'objectif du sous-chapitre est de trouver le débit de pointe à partir duquel la crue peut déborder et soulever les berges.

Nous avons montré au chapitre 6 que pour déposer des sédiments sur le rivage, la rivière Jiu doit atteindre un certain niveau. Étant donnée la variabilité de ce niveau et également le fait que nous ne disposons pas de relevés topographiques suffisantes et d'une relation niveau – débit fiable pour toutes les années analysées, nous prévoyons dans ce chapitre de chercher un débit seuil minimal à partir duquel une crue est soupçonnée avoir débordé. Les méthodes employées à la recherche de ce débit s'enchaînent selon la logique suivante :

**A.** Le mécanisme de formation des dépôts sédimentaires a été décrit au §6.3.1. Il faut donc que la crue atteigne un niveau suffisamment haut pour déborder et déposer sur la berge les matières fines en suspension provenant de l'amont.

**B.** Pour les dépôts à venir, ce niveau correspond au minimum à la cote de la cote actuelle de la berge. Il est évidemment un peu inférieur pour les couches anciennes plus profondes.

**C.** Ce niveau est traduit en débit, qui est considéré comme seuil. Nous devons donc sélectionner les crues dont le débit a dépassé cette valeur seuil.

**D.** Afin d'estimer ce débit seuil, nous utiliserons la relation niveau-débit à la station de Podari, située à environ 300 m en amont de la tranchée d'analyse de la succession des couches sédimentaires.

Le débit de pointe pour sélectionner les crues débordantes doit respecter deux conditions :

✓ Il ne doit pas être inférieur à une certaine valeur influencée par la variabilité morphologique locale et le remous hydraulique. En fonction de cette raison physique, on considère que tout débit de pointe inférieur doit être rejeté de l'analyse, parce qu'il est soupçonné d'être dépendant des changements inhérents dans la partie basse de la courbe de tarage, influencée par la morphologie du lit en étiage.

✓ Il doit être suffisamment haut pour qu'une crue moyenne le mette en submersion. Vue la morphologie du lit variable dans ce secteur de plaine de la rivière Jiu, il faut aussi tenir compte d'un enfoncement général au cours des dernières années et d'une montée du débit de pointe des crues qui ont pu déborder. Par conséquent, la vérification des crues capables d'avoir submergé la berge et déposer pendant la décrue des sédiments au-dessus de la dernière (plus récente) couche doit inclure initialement même les crues des débits maximaux modestes. Par contre, ce raisonnement va seulement jouer dans l'étape de l'attribution effective d'une crue à chaque couche sédimentaire, pas dans le seuillage initial de la chronique de débits journalières, qui devra intégrer une gamme complète des crues avec un écart plus large de débits de pointe.

Afin d'estimer le débit seuil, nous mettrons en œuvre successivement différentes démarches dont les résultats seront analysés à la fin pour choisir la plus appropriée :

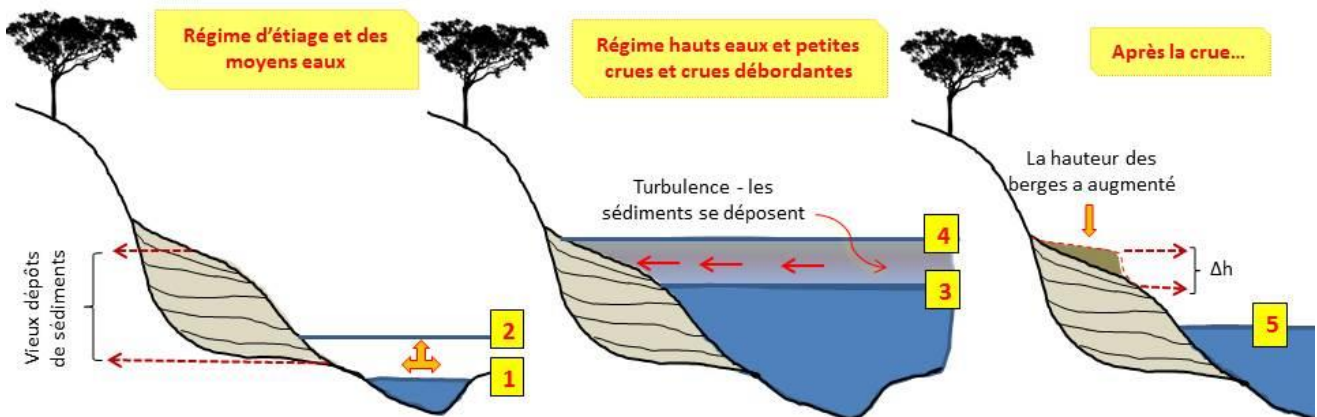
1. En considérant le temps de retour correspondant à ces différents débits de crue ;
2. La simple prise en compte du débit correspondant aux cotes d'alerte établies par les services de gestion des bassins hydrographiques. la modélisation de la relation niveau-débit (calcul de la débitance) ;
3. L'utilisation de la courbe de tarage à la station hydrométrique de Podari ;
4. En prenant en compte les incertitudes, nous fixerons le débit seuil de sélection des crues.

La conséquence hydraulique de cette *dynamique de l'écoulement de l'eau en crue, le dépôt des alluvions*, peut être vue comme une « protection » de la berge contre la même magnitude de crue dans l'avenir, car à chaque crue la berge devient plus haute et le débit doit être plus élevé pour que la prochaine inondation se produise (à supposer qu'il n'y a pas eu lieu d'érosion entre deux épisodes de crue consécutives pour éliminer tous les sédiments fraîchement déposés).

La **Figure VII.1** illustre les phases du régime hydrologique au cours desquelles les berges des rivières sont débordées et explique comment les sédiments se déposent et quelles forces sont en action. Plus le dépôt de sédiments est épais, plus la rivière a besoin d'une force encore plus grande, voir un niveau supérieur à celui qui a déposé la dernière couche.

Dans le cas du dépôt de sédiments de berge à Podari, nous nous intéressons non seulement au niveau de la dernière couche déposée, mais au niveau minimal dans le passé à partir duquel la rivière a déposé la première couche devant la digue. Il est évident que nous ne pourrons pas savoir exactement à quel niveau de l'eau les premières couches de la base de la terrasse ont été faites (alternances du niveau de base général du lit de la rivière, incertitudes sur la relation niveau-débit, manque de relèves topographiques qui indiqueraient le niveau général de

la rivière Jiu au début des années 1970, après la construction de la digue etc). Nous pouvons toutefois avoir une idée sur le niveau minimum à atteindre lors d'une crue, afin que la construction de la berge commence.



**Figure VII.1** Succession des phases d'augmentation du niveau de débordement - dépôt des sédiments. Les chiffres représentent: 1. Niveau de l'eau en étiage (l'eau n'attend le niveau nécessaire pour déborder; la force de transport est faible); 2. Le niveau d'eau à régime moyen (l'eau n'attend le niveau nécessaire pour déborder; la force augmente et la capacité de transport des sédiments en suspension ainsi, mais la plupart des cas il n'y a pas d'accumulation); 3. La rivière est en phase de hauts eaux (le niveau a visiblement augmenté, mais une partie de la berge est encore submergé); 4. Niveau critique de la crue débordante (l'eau met en submersion la berge entière et dépose les sédiments en suspension); 5. Après la crue, l'eau s'est retirée et la nouvelle couche de sédiment est restée en place (la hauteur des berges a augmenté de  $\Delta h$ )

### 7.1.2. Analyse statistique des crues

Dans ce sous-chapitre, nous cherchons d'estimer les débits à des différentes périodes de retour (probabilités de dépassement) en utilisant les probabilités empiriques et théoriques calculées sur la base des séries des débits maximaux annuels à la station hydrométrique de Podari, pour la période 1950 - 2014. Nous avons choisi cette station hydrométrique, car elle se trouve le plus proche possible du site de la tranchée du qu'on a creusée pour analyser le dépôt alluvial. Les probabilités empiriques ( $p$ ) ont été déterminées en utilisant la formule de Weibull [Meylan et Musy, 1998] :

$$P = \frac{r}{n+1}$$

où  $r$  = le rang de la série triée par valeur croissante et  $n$  = le nombre de valeurs de la série.

Le calcul du temps de retour a été fait par la méthode Log Pearson III détaillée par Chow (1951). La loi de distribution de Pearson III est couramment utilisée en Roumanie pour estimer les débits maximaux avec de différentes probabilités de dépassement (temps de retour) [Pişota et al., 2010]. Les courbes d'analyse de la magnitude-fréquence représentent les estimations fiables des fortes crues [Pawar et Hire 2018]. Les ajustements des courbes de probabilités empiriques et théoriques sont assez proches de la plupart des points de données. Par conséquent, cette méthode peut être utilisée de manière fiable et pratique pour lire les intervalles de récurrence pour une magnitude donnée et inversement. En 1951, Chow a proposé une équation générale pour relier la fréquence et la magnitude des crues:

$$Y = \log(Q)$$

$$Y = \bar{Y} + \sigma$$

$$K_y = f(T, S_i)$$

$$Q = \log^{-1}(y)$$

Pour l'analyse annuelle de la fréquence des inondations, pour un site particulier où les débits de crue historiques ont été mesurés, les termes sont définis comme suit :

$Q_y$  = le débit de crue ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 à Y ans

$\bar{Y}$  = moyenne des logarithmes des débits annuels maximaux

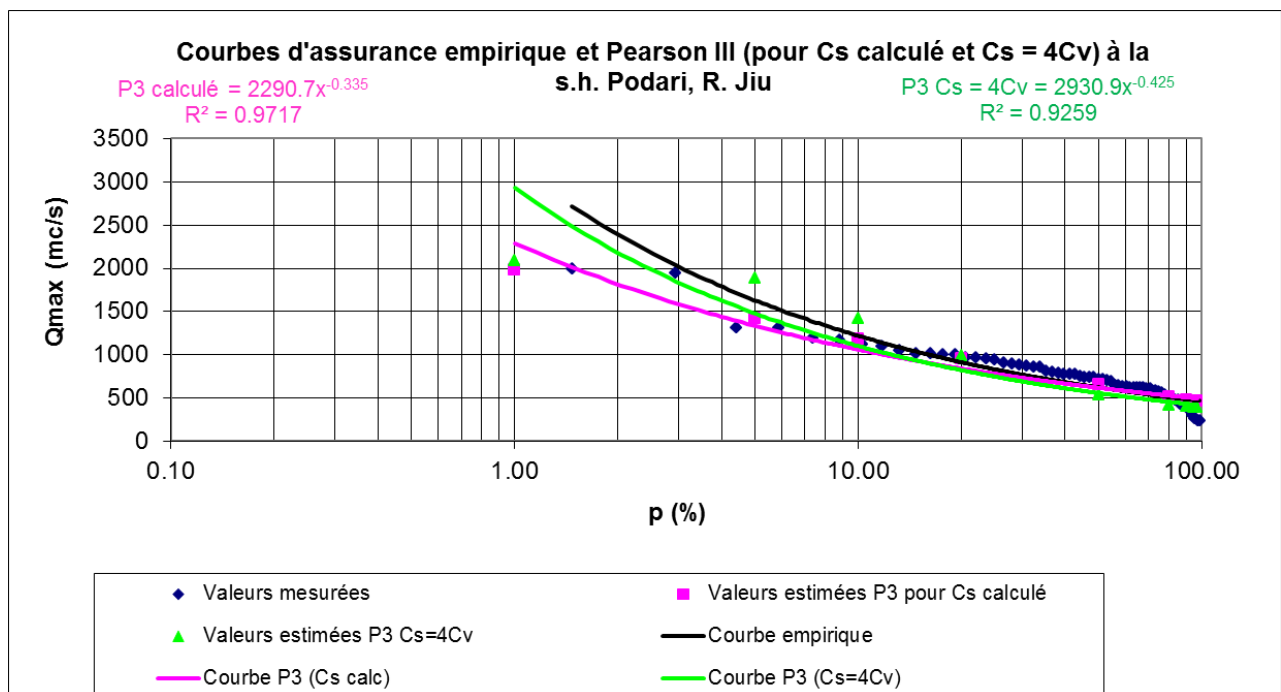
$\sigma$  = écart type des logarithmes des débits annuels maximaux

$S_i$  = Coefficient d'asymétrie du logarithme de Q

$K_y$  = facteur de fréquence pour la fréquence requise (selon le Tableau de Haan, 1977)

T = temps de retour (ans)

La **Figure VII.2** illustre les courbes d'assurance empirique et théorique à la station hydrométrique de Podari, sur la rivière Jiu.



**Figure VII.2.** Lois de régression des débits pour la station hydrométrique de Podari

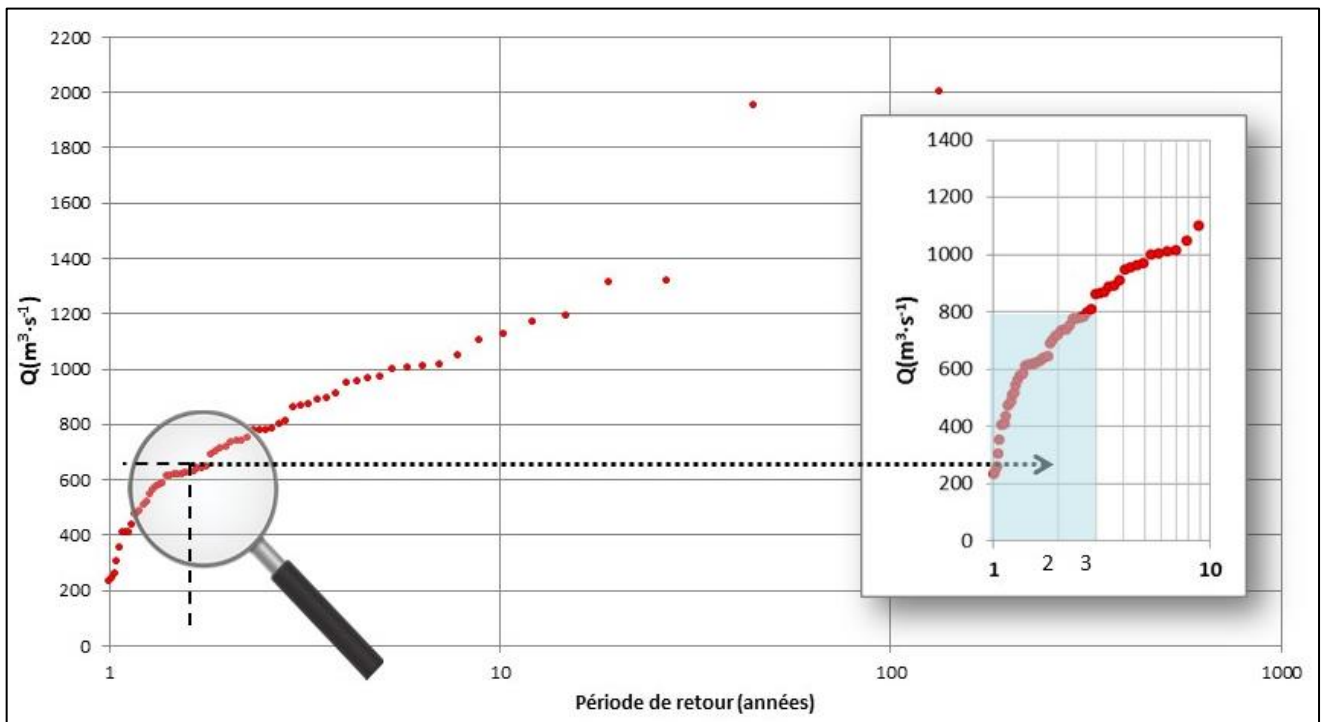
Les débits maximaux de différents temps de retour estimés par la lois empirique et théorique de Pearson III sont présentés dans le **Tableau VII.1**. Le tableau montre que pour les périodes de retour de 1 à 2,5 - 3 ans, qui correspond au débit de plein bord [Meylan *et al.*, 2008], les débits ont des valeurs qui vont de 233 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> à une période de retour de 1 an à 427 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> à période de retour de 3 ans. Pour se rapprocher d'un seuil de débit assez élevé pour qu'on l'utilise désormais pour la sélection des crues débordantes, nous devons garder à l'esprit que la période de retour de moins de 2 ans peut également caractériser les petites crues incapables d'atteindre un niveau minimum de hauteur de la berge en vue du dépôt de sédiment ; le seuil de débit tend donc vers la limite supérieure de l'intervalle.



**Tableau VII.1.** Les débits maximaux de différentes probabilités, estimées avec la loi Pearson III (théorique) et la loi empirique de Weibull

Période de retour (ans)	Probabilité (%)	Débits estimés ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	
		Loi empirique (Weibull)	Loi théorique (Pearson III)
1,05	95,2	221	278
2	50	648	339
3	33,3	740	427
5	20	921	642
10	10	1049	923
50	2	1724	1098
100	1	-	1306
200	0,5	-	1451

Compte tenu de la période de retour (selon la loi empirique) comprise entre 1 et 3 ans, généralement admise comme encadrant les débits minimaux nécessaires d'une crue débordante modélisant les berges, nous avons aussi considéré l'intervalle du débit seuil selon ce critère, au-dessous de  $800 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (**Figure VII.3**).



**Figure VII.3.** Période de retour des débits à la station hydrométrique de Podari

Notons les différences entre le débit correspondant à une période de retour de 3 ans entre la loi empirique (Weibull) et la loi théorique (Pearson III), de  $740 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  à  $427 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , qui vont introduire des incertitudes dans l'estimation du débit minimal à considérer dans le choix des crues possibles à avoir déborder. Dans les sous-chapitres suivants, nous allons aussi prendre en considération des critères physiques dans le calcul du débit seuil des crues ayant déposés les couches sédimentaires, en analysant la relation niveau – débit. Selon [Dury et al. \(1963\)](#), la fréquence du débit suffisamment élevé pour atteindre le niveau supérieur de la berge (le débit à pleins bords qu'on verra développé dans le §7.1.3.2 par la méthode géométrique de Manning – Strickler, est d'environ

1,58 ans. La relation entre ce débit à temps de retour de 1,58 ans est le débit capable mettre la rivière en débordement est :

$$Q_b = 0,97 \cdot Q_t$$

où  $Q_b$  = le débit à pleins bords selon la méthode statistique et  $Q_t$  = le débit « dont la récurrence est de 1,58 ans » (selon Dury, 1973, cité par Ioana – Toroimac, 2009). Nous avons déterminé ce débit en fonction des deux lois utilisées : la loi empirique de Weibull et la loi théorique de Pearson III. Etant donnés les débits très différents pour les périodes de retour encadrant 1,58 ans, selon les deux lois, le débit à pleins bords calculé sur des bases statistiques a été aussi différents, de  $445 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la loi empirique et de  $302 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la loi théorique (Tableau VII.2).

**Tableau VII.2.** Le débit à pleins bords selon le temps de retour

Temps de retours (ans)	$Q_{1,58}$ <i>Loi empirique (Weibull)</i>	$Q_{1,58}$ <i>Loi théorique (Pearson III)</i>
1,58	$459 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$312 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_b$	$445 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	<b><math>302 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math></b>

### 7.1.3. Détermination d'un débit seuil de débordement

#### 7.1.3.1. Exploitation des données techniques de la station hydrométrique

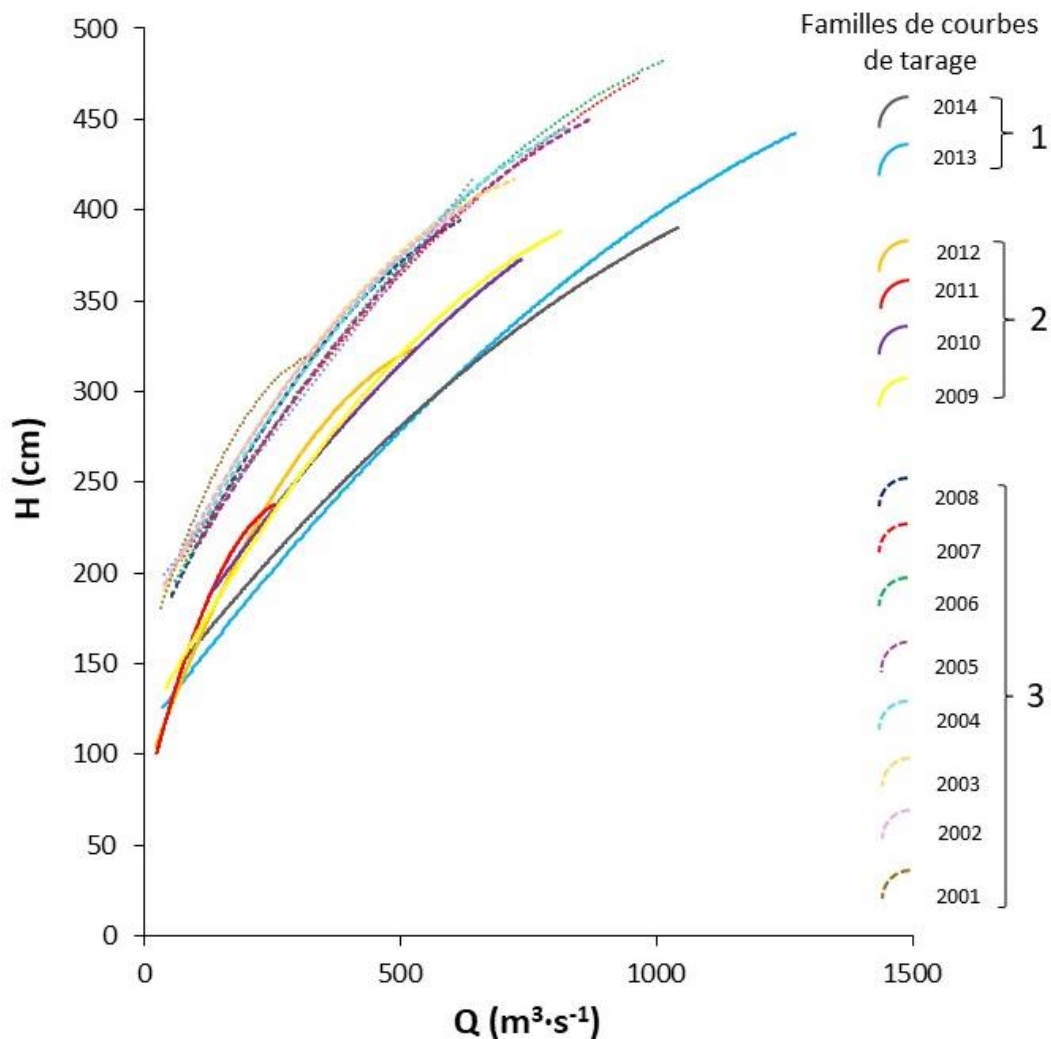
L'analyse des crues débordantes est un outil dans la quête des événements les plus probables d'avoir transporté des quantités importantes de sédiments et construire les berges. Il faut rappeler ici l'hypothèse de l'existence d'un site le long du profil longitudinal de la rivière Jiu, où la plupart des sédiments fins aurait dû être déposée et rappeler que ce genre de site pourrait nous aider à comprendre comment les sédiments se sont déplacés des zones d'érosion - production du bassin versant vers les zones de dépôt. Compte tenu des digues le long de la rivière Jiu entre le secteur de montagne et celui du piémont – plaine, peu de tronçons seraient adéquats aux tels études sur la relation entre les crues et les dépôts alluviaux, ce qui nous a amené directement au secteur aval situé à quelques dizaines de mètres de la station hydrométrique Podari, le site de mesure le plus important pour l'ensemble du bassin de la rivière Jiu. Par conséquent, la **relation niveau débit** au droit de la tranchée sera déduite en utilisant les courbes de tarage de la station de Podari, à partir d'une hypothèse de régime uniforme entre les deux sections de rivière distantes de 295 m.

Afin d'identifier le débit nécessaire au débordement à l'endroit de la tranchée utilisée comme archive sédimentaire, une des démarches a été de valoriser la courbe de tarage qui donne la relation entre le débit et le niveau de la rivière Jiu à la station hydrométrique de Podari. Dans une situation idéale, les changements morphologiques du lit de la rivière causés par les grandes crues et influençant la relation niveau-débit, devraient être prises en considération. Par conséquent, il aurait été indiqué d'utiliser des courbes de tarage actualisées, à une résolution temporelle au moins annuelle, sinon plus fréquente (après des grandes crues). Dans notre étude, des limites sont à mentionner en ce qui concerne deux types de données : **a)** le nombre réduit des profils en travers

de la rivière qui permettent de modéliser les possibles changements morphologiques du lit mineur à la station hydrométrique de Podari et **b)** la fréquence insuffisante des mesures du niveau d'eau et du débit correspondant, pour construire une courbe de tarage adaptée au chaque changement morphologique.

Afin de relier les événements hydrologiques (les plus grandes crues) aux dépôts alluviaux au droit de la tranchée située 300 m aval de la station hydrométrique de Podari, un nouveau défi apparaît : transférer la relation niveau – débit de la station au site de la tranchée. Dans ce but, la logique a été de commencer par une première courbe qui correspond autant que possible à une année caractéristique (avec une crue majeure). L'estimation d'un débit de débordement intégrant les critères mentionnés (changements géomorphologiques, variations de la relation niveau - débit) peut se faire par le biais d'une série de méthodes que nous avons ensuite reliées.

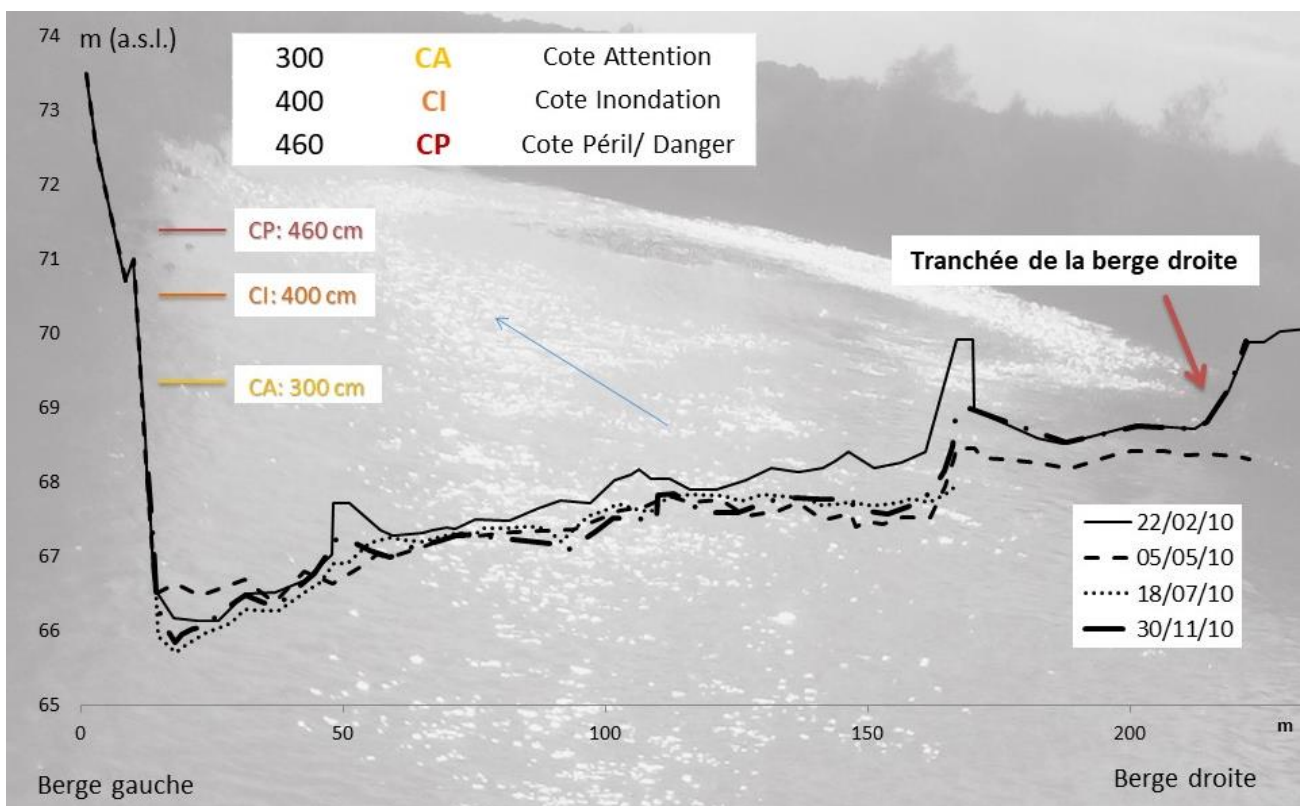
On dispose de quelques courbes de tarages à Podari. Ces courbes ont été établies et sont régulièrement actualisées par l'Administration Nationale Eaux Roumaines (Administration Basinale de la rivière Jiu, l'ABA Jiu) et établies à partir de mesures directes du débit par intégration du profil des vitesses. On a tracé sur la **Figure VII.4** les différentes courbes de tarage utilisées à la station de Podari entre les années 2001 et 2014.



**Figure VII.4.** Les courbes de tarage disponibles pour la période 2001 – 2014 et l'incertitude liée à l'absence d'équivalence du débit d'une rivière pour le même niveau d'eau à partir d'un certain seuil

Celles-ci sont groupées en trois régions : **1.** Les dernières deux courbes de tarage (2013 – 2014) sont isolées dans la partie basse du graphique, avec des débits élevés et des niveaux plus petits à atteindre ; **2.** Les courbes de tarage entre 2009 et 2012, avec des débits maximaux sur lesquels les courbes ont été définies un peu plus faibles (inférieurs à  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), mais avec des niveaux correspondants plus hauts par rapport aux niveaux atteints lors des crues de 2013 et 2014 ; **3.** Le groupe des courbes de tarage entre 2001 et 2008, avec des débits mesurés en 2004 et 2007 comparables à ceux de la première famille de 2013 – 2014, pour lesquels des niveaux beaucoup plus hauts ont été atteints.

Cette présentation côte à côte des différentes courbes de tarage nous enseigne que, durant toute une courte période d'analyse de 14 ans, les relations niveau – débit peuvent beaucoup changer et affecter le débit seuil considéré pour le débordement d'une année à l'autre. Nous n'excluons pas les possibles incertitudes liées à la construction des courbes de tarage, liées aux mesures et au changement de la morphologie du lit de la rivière Jiu après une crue forte. Au quotidien, ces courbes permettent de déterminer le débit de la rivière à partir d'une mesure (ou d'un enregistrement) du niveau d'eau lu sur l'échelle hydrométrique (hauteur d'eau par rapport au « zéro » arbitraire de l'échelle). La variabilité de ces relations, en particulier pour des débits faibles et moyens traduits les changements morphologiques dans le lit mineur dans la section et en aval. Les relations niveau – débit que nous avons utilisé correspondent aux années 2010 et 2014, caractérisées par des crues majeures. Ces relations correspondent aux courbes de tarage de la station de Podari, où le zéro de l'échelle correspond à l'altitude 66.910 m, Sur la **Figure VII.5** nous illustrons ces relations niveau – débit sur les profils en travers réalisés en 2010.

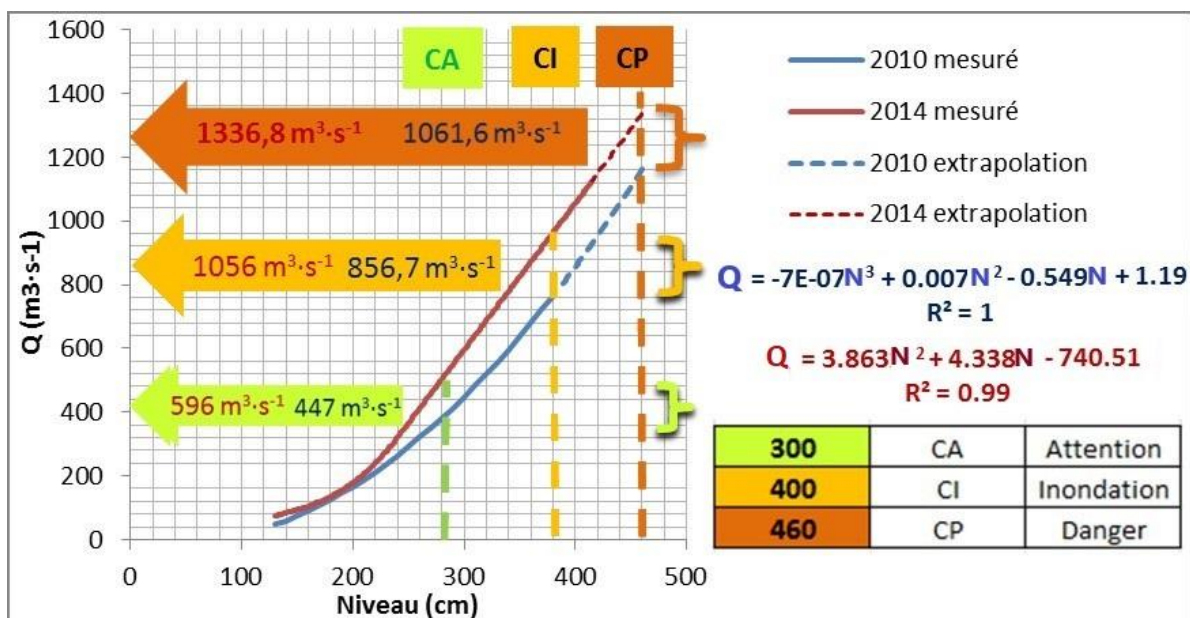


**Figure VII.5.** Le profil en travers de la rivière Jiu à la station hydrométrique de Podari et les cotes à l'échelle

A l'échelle de la Roumanie, les services hydrologiques établissent des niveaux/ cotes d'alerte, utilisés dans la gestion du risque inondation. Ces niveaux englobent trois valeurs en fonction desquelles des actions spécifiques se mettent en place pour la protection contre les inondations, en faisant la liaison entre le processus de débordement de l'eau et les dégâts potentiels [Règlement national pour la gestion des situations d'urgence]. En pratique, ces cotes d'alerte sont importantes dans la prévention du risque inondation pour les zones non perturbées des cours d'eau, comme c'est le cas du secteur étudié :

- a) **côte d'attention (CA)** - niveau indiquant que le risque d'inondation est possible dans une période relativement courte, au cours de laquelle des actions de défense ou d'évacuation peuvent être organisées ;
- b) **côte d'inondation (CI)** - niveau où le plus proche objectif socio-économique commence à être inondé;
- c) **côte de danger / de péril (CP)** - niveau où la rivière déborde et des mesures spéciales sont nécessaires pour évacuer des personnes et des biens et des restrictions à l'utilisation des ponts et des routes sont mises en place, ainsi que pour exploiter les constructions hydrotechniques.

A la station de Podari, conformément aux données de l'ABA Jiu, la cote d'attention correspond au niveau de 300 cm, celle d'inondation à 400 cm et celle de danger, à 460 cm (valeurs marquées sur l'échelle limnimétrique) (*Figure VII.6*). Par rapport à ces valeurs, il faut préciser que, pour la période analysée (2001-2014), aucun débit n'a atteint la côte de danger (460 cm), mais il existe des événements hydrologiques au cours desquels le niveau d'inondation (400 cm) a été atteint. Dans l'approche temporelle des crues, nous devons tenir compte de la montée continue du niveau de submersion de la berge devant la digue, qui s'est formée récemment à travers des épisodes de dépôts successifs laissés par les inondations.



**Figure VII.6.** Les cotes d'alerte et les débits correspondants à la station Podari et les courbes de tarage de 2010 et 2014 (CA – 300 cm, CI – 400 cm, CP – 460 cm)

Par conséquent, nous avons considéré que la cote cherchée du débit – seuil doit être plus basse que celle valable pour les crues actuelles, probablement entre le niveau d'alerte et celui d'inondation (300 – 400 cm). Selon



cette logique, nous avons pris cette référence pour sélectionner les crues à analyser, en faisant l’hypothèse du régime uniforme de l’écoulement entre la station hydrométrique et le site de la tranchée, car les instabilités locales du lit mineur ne peuvent pas trop influencer la relation niveau – débit pour les hauts débits de crue.

La difficulté de l’analyse apparaît lorsque le niveau de l’eau est transformé en un niveau nécessaire pour le dépôt de sédiments sur la berge. Même si le niveau de 400 cm restait fixe, par rapport à la cote du zéro de l’échelle, avec l’altitude absolue de 66,91 m, le débit correspondant est très probablement différent d’une année à l’autre, force de cette relation niveau - débit qui dépend de la dynamique du lit et donc de la géométrie de la section active. Étant donnée la variabilité des relations niveau – débit, la position en altitude de la hauteur de la berge au site de la tranchée par rapport à la berge de jaugeage de la station hydrométrique de Podari, le but final sera d’arriver au débit seuil de début de débordement pour chaque période d’étude qui permettra de sélectionner les crues à analyser.

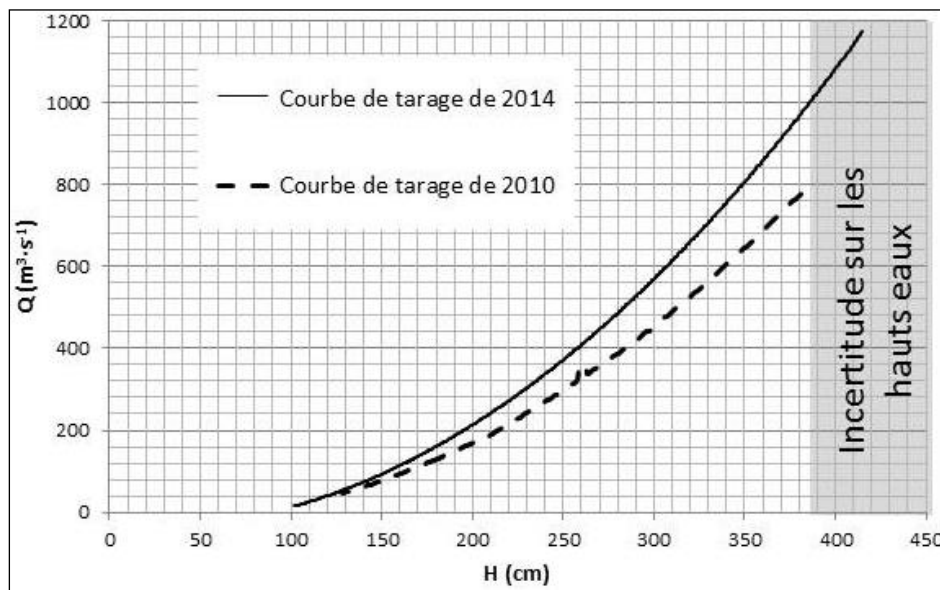
On distingue ainsi différentes parties dans une courbe de tarage :

(1) Pour les bas débits, l’écoulement est rarement uniforme et la relation dépend des conditions topographiques en aval de la section de mesure. Les différentes courbes disponibles, tracées sur la **Figure VII.4** ont montré cette variabilité de ces conditions topographiques.

(2) Pour les débits intermédiaires, la relation est globalement stable dans le temps. Elle traduit des conditions de régime uniforme.

(3) À partir du débordement, il est difficile à mesurer, donc il faut déduire le débit en crue à partir du calcul. Il y a des incertitudes importantes sur le niveau de débordement et sa relation avec le débit de pointe.

Il y a ainsi beaucoup d’incertitudes des débits en crue, dues notamment au fait que la relation niveau – débit change d’une année à l’autre, voire d’une crue à l’autre. Si on compare les deux courbes de 2010 et 2014 (**Figure VII.7**), on souligne des différences dans la relation niveau – débit, qui dépendent d’un nombre de facteurs.



**Figure VII.7.** Les courbes de tarage de 2010 et 2014

En analysant les courbes de tarage de 2010 et 2014 (pour lesquelles nous avons eu accès aux profils en travers au début du stage doctoral), nous avons pu constater une différence moyenne d'environ  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  sur toute la gamme des débits mesurés, de la phase d'étiage jusqu'au régime de crue, qui augmente à une différence de débit d'environ  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la partie supérieure de la courbe de tarage, correspondant à de grandes crues débordantes ( $Q_{\text{equiv.}} = f_{(N > 400 \text{ cm})}$ ). Par exemple, pour la cote de 400 cm, le débit correspondant a été de l'ordre de  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en 2014 et seulement de  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en 2010. Par conséquent, nous ne pouvons pas utiliser la même courbe de tarage pour toutes les années. Au-delà des débits obtenus des mesures réelles, en crue, les courbes ont été extrapolées.

Ces incertitudes peuvent apparaître pour différentes raisons :

1. La courbe de la relation niveau – débit est différente chaque année en fonction du régime hydrologique caractéristique de l'année
2. L'emplacement et l'installation de l'échelle limnimétrique peuvent introduire des erreurs de mesures et des changements de la relation mathématique pour estimer les débits à partir du niveau à la base des relevés topographiques de la section en travers ;
3. Le niveau de confiance sur la partie haute de la courbe, où les débits les plus élevés ne sont pour la plupart calculés par mesures, mais estimés. On fait ici l'observation qu'au dépit de cette incertitude pour la partie haute de la courbe décrivant la relation niveau – débit, cela n'est pas dépendante du transfert au site de la tranchée (295 m aval le long d'un tronçon considéré rectiligne), si on admet l'hypothèse du régime uniforme.

Nous utiliserons donc la même relation niveau – débit pour la section en travers à la station hydrométrique de Podari elle-même que pour la tranchée, en faisant l'hypothèse du régime uniforme. Le niveau zéro de la tranchée a été fixé au niveau de l'eau de 114 cm au moment du recueil des échantillons (le 9 juin 2017), soit pour un débit  $Q=68,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . La relation niveau-débit de Podari est décalée de 4 cm pour établir la relation niveau-débit au droit de la tranchée. On ajoute donc les incertitudes suivantes :

- Au bas débit, les effets de remous des conditions topographiques sont différents et la courbe n'est donc pas exploitable (typiquement pour les débits inférieurs à  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- À partir du débordement du fait de la hauteur des berges qui n'est pas connue.

En considérant les différentes incertitudes, on fixe un débit seuil de débordement potentiel  $Q_j=600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et on examinera par la suite tous les événements dont le débit de point journalier dépasse cette valeur. Ce seuil devra être confirmé par les différentes analyses qu'on va développer dans les prochaines sections.

La sélection de ce seuil permet aussi de prendre en compte les faits suivants :

- ✓ C'est le débit de pointe instantané, et non le débit moyen journalier, qui doit être considéré ; bien que la durée d'inondation, et donc la quantité de sédiments déposée soit faible pour les crues brèves.
- ✓ La cote de la berge augmente progressivement, pour les couches les plus profondes.

En partant du haut de la tranchée, on remonte le temps avec l'hypothèse que chaque couche correspond à une crue seulement. Incertitudes sur les débits associés aux différents horizons, sur les niveaux des horizons, sur la relation niveau-débit à partir de la courbe de tarage fabriquée dans une certaine année. Les délimitations des différentes strates ont été faites a priori sur le terrain ; elles devront être confirmées par les analyses des propriétés des sédiments qui les composent (chapitre §9).

### 7.1.3.2. Le débit à pleins bords – le bon seuil pour le niveau à déborder ?

Dans certains cas, les informations nécessaires pour estimer la relation niveau-débit pour les hauts débits (durant les crues) ne sont pas disponibles et on fait appel à d'autres méthodes d'estimation des débits morphogènes. Une telle approche est basée sur le calcul du débit à plein bord. Le débit à plein bord est un paramètre clé pour l'estimation de la géométrie du chenal. Le débit à plein bord est souvent associé à une crue d'un temps de retour donnée (par exemple une crue avec un débit de pointe avec une probabilité de dépassement de 50%) [Williams, 1978].

Le débit à plein bord a également été défini à l'aide de facteurs morphologiques. Le débit à plein bord correspond également physiquement au sommet du dépôt alluvial au bord de la rivière. Diverses définitions soutiennent la relation entre cette notion et la hauteur de la rive atteinte par les plus fortes inondations. Selon Schumm (1960), le débit à plein bord correspond à la hauteur de la limite inférieure de la végétation pérenne, principalement des arbres. De même, Leopold (1994) affirme que ce débit est indiqué par un changement de végétation, tel que des herbes et des arbustes. Nous avons de telles évidences sur le terrain, données par la présence d'herbes et d'arbres à quelques mètres du bord supérieur de la rivière où nous avons commencé à creuser le profil vertical (Figure VII.8).



Figure VII.8. Le débit à plein bord probable sur le tronçon de la rivière Jiu entre la s.h. Podari et la tranchée (cliché : Moroşanu, 2017)

Nixon (1959) a défini le stade de débordement comme la plus haute élévation d'une rivière pouvant être contenue dans le chenal sans que de l'eau ne se déverse sur la plaine inondable ou les zones de lavage. Enfin, la phase de débordement est également définie comme l'élévation moyenne de la surface la plus élevée des barres de chenal [Wolman et Leopold, 1957], alors que la forme de relief que nous explorons est typiquement une barre de sable (*angl.*, « point bar »).

Pour éviter certains problèmes liés à la détermination sur le terrain du débit à plein bord, le débit est assimilé à celui morphogène (de formation et modélisation du chenal et des berges) et il est souvent supposé être représenté par un intervalle de récurrence spécifique. Certains chercheurs estiment que ce débit représentatif équivaut au débit à plein bord. Dans beaucoup d'ouvrages sur ce sujet, la notion de « débit à plein bord » et utilisée comme synonyme du « débit de débordement », alors que des différences morphogènes existent. L'estimation la plus ancienne du débit morphogène a été fait à la base du flux annuel moyen [Leopold et Maddock, 1953]. Quelques années plus tard, Wolman et Leopold (1957) ont suggéré que le débit capable à modifier le chenal formant un canal a une récurrence tous les 1 à 2 ans. Dury (1973) a conclu que la décharge formant un chenal correspond à environ 97% du débit de 1,58 ans ou de la plus probable des inondations annuelles. En France, comme en Roumanie, pour la plupart des rivières, le débit de plein bord correspond à une crue de période de retour de 1 à 2,5 - 3 ans [Amoros et Petts, 1993 ; Pişota et Zaharia, 2002 ; Meylan et al., 2008; Degoutte, 2012]. On apprécie, quand même, que le débit capable à surélever la berge doit avoir une période de retour plus grande, notamment dans les cas des berges ayant une épaisseur des couches assez importante, comme celui de Podari.

Le débit morphogène est souvent utilisé en analyse conjointe avec le débit efficace, définis comme l'incrément de rejets qui transportent la plus grande fraction du chargement de sédiments sur une période de plusieurs années [Andrews 1980]. La détermination du débit effectif est faite à partir des courbes de classement des sédiments et de durée d'écoulement. Le pic de courbe de magnitude et de fréquence (courbe en C) marque le débit le plus efficace pour transporter les sédiments [Wolman et Miller, 1960] (Figure VIII.9).

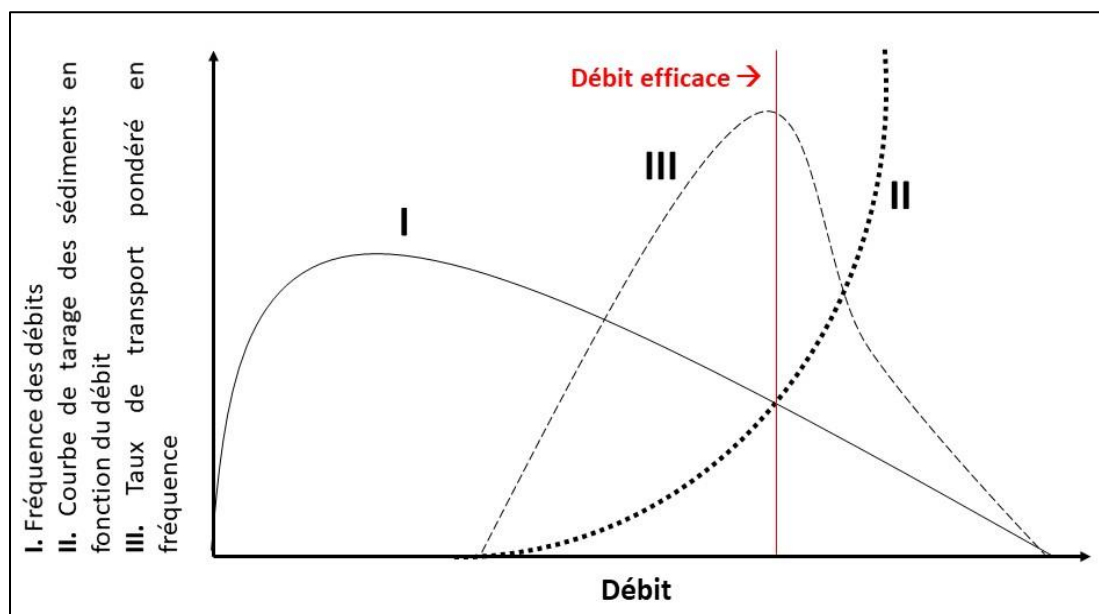
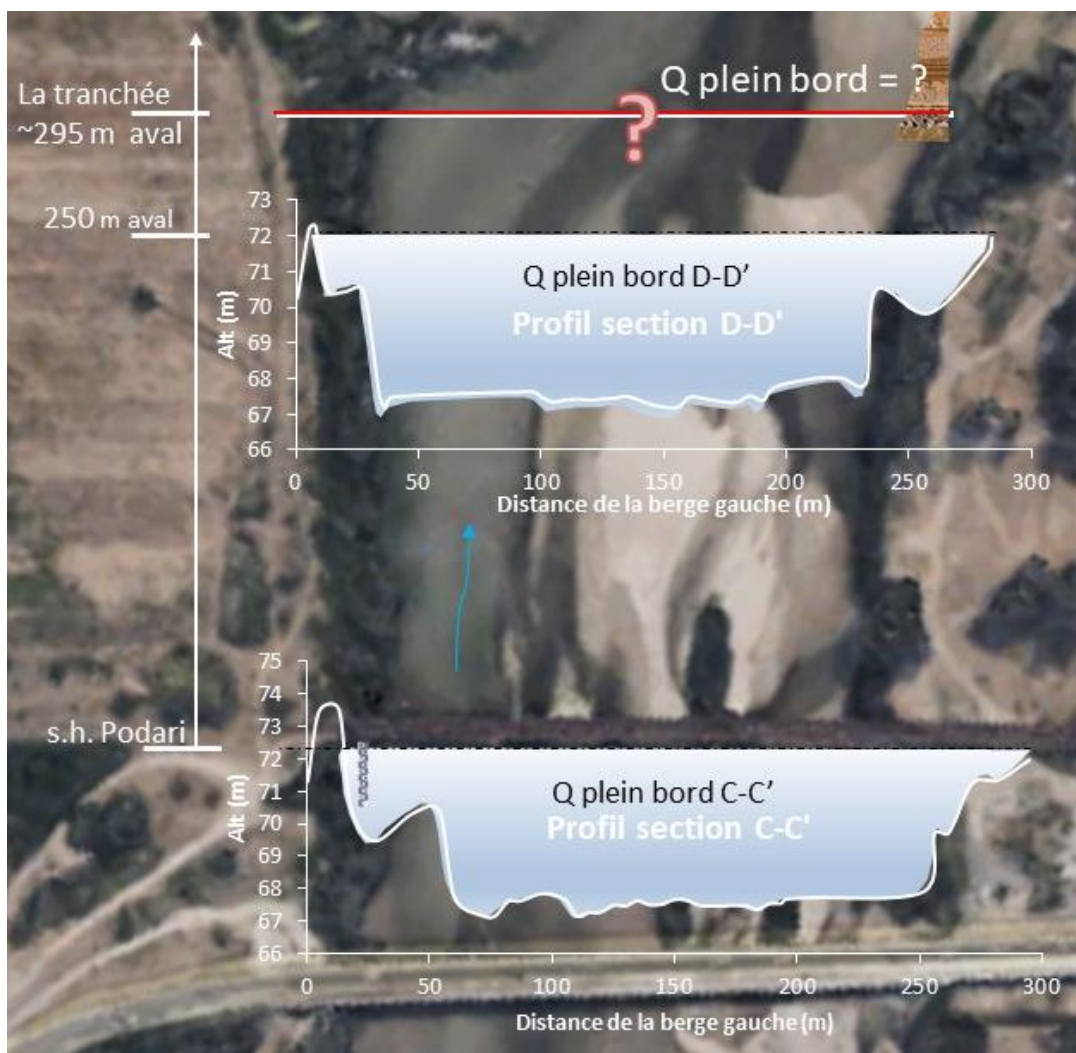


Figure VIII.9. Relation théorique entre le débit efficace et la courbe de magnitude – fréquence

Afin de calculer le débit à plein bord, nous avons pris la démarche présentée, basée sur l'équation de Manning [Chow, 1959, d'après Dumitriu, 2017]:

- Réalisation / acquisition d'au moins un profil en travers. Des relevés topographiques aux stations de jaugeage de la Jiu (profils en travers du chenal, pente de la ligne d'eau) sont effectuées lors de la mesure du débits liquide et elles ont été acquies de l'ABA Jiu de Craiova ;

- Le calcul des paramètres de la section mouillée à plein bord : la superficie, le périmètre et le rayon hydraulique (**Figure VII.10**). La procédure par Pişota et Zaharia (2010) consiste à découper la section transversale de la rivière au droit de la station hydrométrique dans plusieurs figures géométriques régulières, dont l'aire peut être facilement estimer. Près des rive gauche et droite, les figures sont des triangles, tandis qu'à l'intérieur, la section mouillée se réduit à des figures sous la forme des trapèzes, avec la base inclinée orientée coté lit de la rivière.

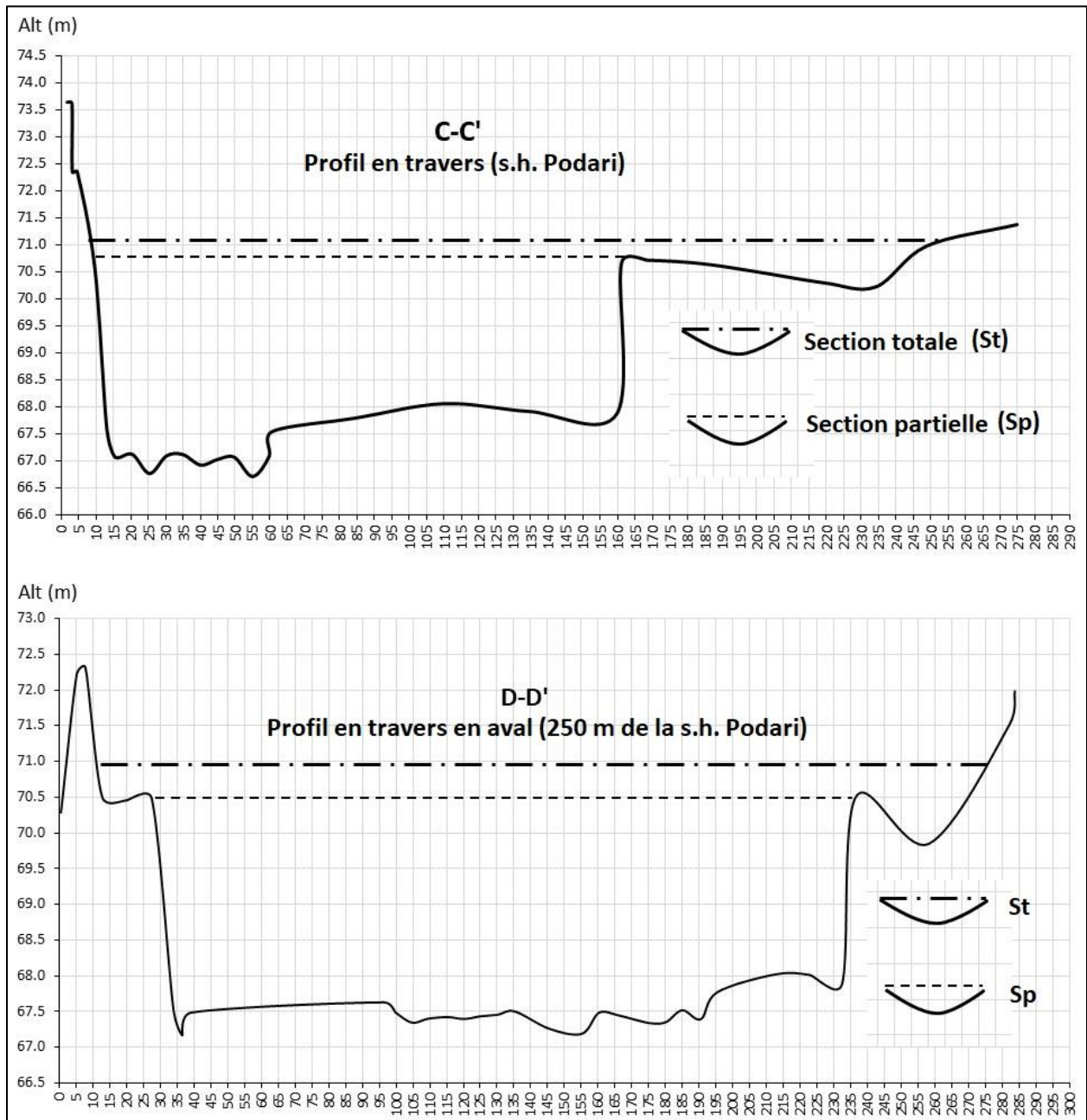


**Figure VII.10.** La section en travers à la station hydrométrique de Podari, la rivière Jiu

Entre chaque verticale de vitesse (environ chaque 5 mètres), l'aire partielle est ensuite calculée, *l'aire totale de la section mouillée* étant la somme de celles-ci. *Le périmètre* représente "la somme de la longueur du fond du chenal et du miroir de l'eau en profil transversal" [Ioana - Toroimac, 2009] est il a été calculé toujours à



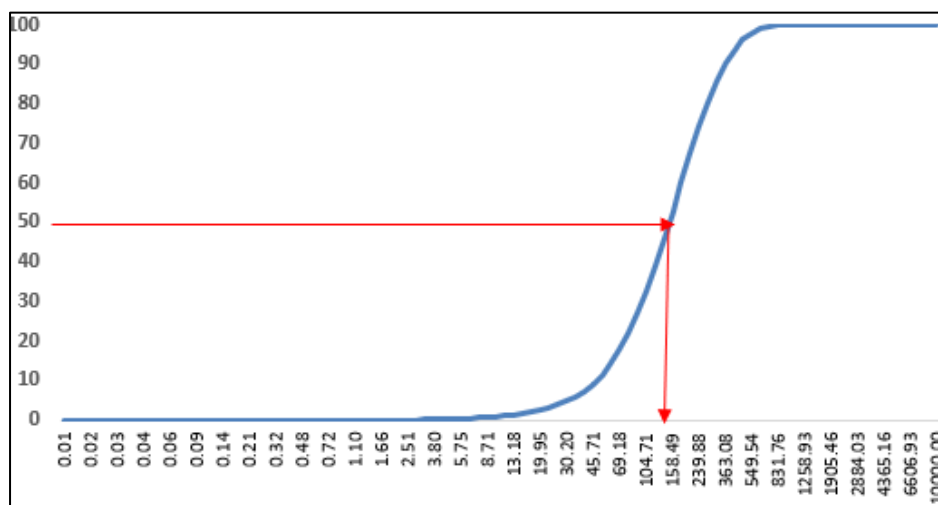
partir des dimensions des sections partielles définies entre les verticales de vitesse dans la démarche de calcul de l'aire mouillée. Enfin, *le rayon hydraulique* se calcule comme “le rayon du cercle circonscrit à la section transversale” [Ioana - Toroimac, 2009] et il est approximé en hydrologie – hydraulique en tant que rapport entre l'aire mouillée et le périmètre de la section transversale [Pişota et Zaharia, 2010]. Pour ce calcul, nous avons utilisé les profils en travers de 2017 (l'année de la réalisation de la tranchée en aval de s.h. Podari). Un des profils correspond à la station hydrométrique elle-même (noté C-C') et l'autre est la section en travers 250 m en aval de la station (noté D-D'), donc à 45 m amont de la tranchée (*Figure VII.11*).



**Figure VII.11.** Les deux sections en travers avec les deux aires mouillées considérées, en fonction de l'extension du débordement jusqu'à la berge droite ( $S_p$ ) ou jusqu'à la digue ( $S_t$ )

Le but des deux calculs a été de comparer les débits à plein bord des deux sections et à vérifier si, par une géométrie du lit et des berges un peu différentes, nous allons obtenir des résultats trop différents. Nous avons choisi de calculer le débit à plein bords pour deux situations sur les profils en travers à la station hydrométrique de Podari (C-C') et en aval (D-D'), en considérant deux niveaux de plein bord, en fonction de la berge sur la rive droite. L'aire mouillée de toute la surface jusqu'à la digue a été notée avec « S<sub>t</sub> » et l'aire mouillée partielle (considérée jusqu'au niveau le plus haut de la berge abrupte vers l'intérieur a été notée avec « S<sub>p</sub> ».

- L'estimation de la rugosité du lit pour les profils en travers (en fonction de la lithologie, la granulométrie du substrat et la végétation):  $n = d_{50}^{1/6} / 21,1$  [Chow, 1964], où  $d_{50}$  représente le diamètre équivalent permettant de séparer 50% en poids des particules. La mesure des dimensions des granulats du substrat a été faite dans le laboratoire afin de déterminer leur diamètre médian et leurs poids. Sur la **Figure VIII.12**, il est possible de repérer le diamètre médian des grains de sable du lit de la rivière à Podari, autour de la valeur de 159 μm.



**Figure VIII.12.** La courbe de répartition du diamètre des particules de l'échantillon prélevés du lit de la rivière Jiu à s.h. Podari

- Le calcul de la vitesse moyenne de l'eau selon la formule de Manning. Cette valeur de la vitesse est considérée uniforme pour toute la superficie de la section mouillée [Chow, 1964]:

$$V = \frac{k}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Avec  $R = A/P$

- Où, V – la vitesse moyenne de l'eau (m/s), R - le rayon hydraulique (m), A– la superficie de la section mouillée (m<sup>2</sup>), P– le périmètre de la section mouillée (m), S– la pente de la ligne d'eau (%), n – le coefficient de rugosité calculée selon la formule de Strickler, k – la constante de conversion (égale à 1 pour le Système international d'unités de mesure).

- Le calcul du débit à plein bord (Q<sub>b</sub>, en m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>):

$$Q_b = A \cdot V_m$$

Le **Tableau VII.3** récapitule les résultats du calcul du débit à plein bord pour la section de Podari sur la rivière Jiu.

**Tableau VII.3.** Résultats intermédiaires et finaux du calcul du débit à plein bord à Podari, la rivière Jiu

Les sections en travers		A (m <sup>2</sup> )	P (m)	R	Pente (‰)	D <sub>50</sub>	n	V <sub>m</sub>	Q <sub>b</sub>
C-C'	S <sub>p</sub>	468	302	1.55	0.8	159 μm	0.76	1.58	737.67
	S <sub>t</sub>	550	363.5	1.51	0.8	159 μm	0.76	1.55	851.95
D-D'	S <sub>p</sub>	595	489	1.22	0.7	159 μm	0.76	1.26	747.87
	S <sub>t</sub>	735	528	1.39	0.7	159 μm	0.76	1.37	1007.78

La plage des débits calculés est assez large, étant données les différences de géométrie entre les deux sections en travers, d'un côté, et les hauteurs considérées pour le plein bord. On garde de vue l'intervalle des valeurs du débit (entre 738 et 1008 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) pour la comparer avec les autres valeurs seuils qu'on va déterminer avec les autres méthodes.

### 7.1.3.3. Calibrage des modèles HEC-RAS pour le développement des courbes de tarage

La compréhension de la relation niveau-débit au droit de la tranchée requiert l'utilisation des courbes de tarage, qui se définissent comme la relation entre le niveau et le débit de l'eau à une station hydrométrique. Dans la relation empirique et théorique entre le niveau de l'eau et le débit, la fiabilité des valeurs des données de débit utilisées dans la calibration de la courbe de tarage est extrêmement importante, surtout dans les phases de hautes et basses eaux.

La plus simple méthode traditionnellement utilisée pour collecter des informations sur le débit actuel consiste à mesurer le niveau de l'eau à l'aide de jauges pour autant de fois possible. Cependant, pendant les crues, il est difficile d'obtenir des mesures directes en raison On ne peut pas mesurer la contribution du débit dans le lit majeur. Il est aussi coûteux d'assurer le personnel hydrométrique à chaque moment, afin de faire les mesures et il faut utiliser des instruments performants pour obtenir la relation niveau-débit. Il faut aussi mentionner l'accessibilité limitée et des fréquentes variations du débit horaire, ce qui empêche un suivi hydrologique systématique tout au long de la crue et surtout lors de l'enregistrement du débit de pointe. Plusieurs méthodes ont été proposées pour améliorer l'ajustement de la relation niveau-débit pour les moments sans mesures, mais en général, elles n'ont pas correctement évalué les principes fondamentaux gouvernant la variation du débit, en ignorant la mécanique des fluides [Braça, 2008]. En conséquence, plusieurs difficultés liées aux évaluations de la relation niveau – débit ont été reconnues, comme c'est souvent l'exemple d'une relation multiple entre les deux variables. C'est le cas où la pente de la surface de l'eau produit différents débits pour le même niveau, ou bien la situation de l'estimation de cette relation pour les sections avec des lit mobiles et pour des sites localisés entre deux stations hydrométriques, comme c'est le cas du site de la tranchée aval de la s.h. Podari.

Les incertitudes liées à la relation niveau – débit ne sont pas à négliger et il en a fallu tenir compte les réduire autant que possible:

- Il est difficile d'améliorer empiriquement les enregistrements de débit des stations hydrométriques pour des conditions hydro-morphologiques / hydrauliques différentes de celles du

moment de la vraie mesure. Ainsi, la question serait comment extrapoler les données au-delà de la plage de mesure.

- Moins examinée, mais aussi importante est la compréhension des phénomènes physiques que ces relations empiriques tentent de décrire. Seule l'utilisation de la statistique dans l'extrapolation de la courbe de tarage ne suffit pas pour considérer toute la gamme de processus et caractéristiques du milieu fluvial sans faisant appel à la modélisation hydraulique.
- Le troisième problème vise l'incertitude des relations niveau - débit.

La pratique actuelle pour la construction des courbes de tarage remonte au début du XX<sup>e</sup> siècle, lorsque [Jones \(1916\)](#) propose une méthode pour corriger les relations entre le niveau et le débit en tenant compte de la pente de la surface de l'eau. Une grande partie des pratiques modernes ont été élaborées par le United States Geological Survey (USGS), certaines des méthodes étant actuellement largement utilisées en hydrologie opérationnelle [[Corbett et al., 1943](#); [Rantz, 1963](#); [OMM, 1980](#); [ISO, 1998](#)]. D'autres sources sur la méthode de construction et extrapolation des courbes de tarages sont à trouver dans le National Engineering Handbook [[Pasley et al., 1972](#)] et le "Streamflow Measurement" de [Herschey \(1995\)](#).

Les premières réponses à la problématique des processus réagissant sur l'interface surface libre – berges ont été apportées par [Schmidt et Yen \(2001\)](#), qui ont examiné la relation entre le niveau de la rivière et le débit dans les chenaux ouverts en se basant sur l'hydrodynamique fondamentale des écoulements instables et non homogènes. Différents chercheurs ont examiné les incertitudes dans les évaluations empiriques des niveaux de débit et les incertitudes qui en résultent dans les enregistrements du niveau de l'eau de ces stations. Près de notre sujet d'étude, plusieurs publications traitent de l'incertitude sur l'estimation du débit de pointe [[Clarke, 1999](#); [Clark et al., 2000](#); [Claps et al., 2003](#); [Parodi et Ferraris, 2004](#); [Aronica et al., 2005, 2006](#)]. Comme les évaluations se font sur des courbes empiriques, les analyses d'incertitude se limitent généralement à un examen statistique de ces courbes.

Deux autres points spécifiques méritent d'être mentionnés : (1) l'utilisation de méthodes numériques hydrauliques pour définir une courbe de tarage et son extrapolation au-delà de la plage de mesure [[Franchini et al., 1999](#)] et (2) la possibilité de reconstruire une courbe de tarage dans une section de rivière où seul le niveau d'eau est surveillé, en utilisant le débit enregistré dans une section en amont [[Barbetta et al., 2003](#)].

La courbe de tarage transforme les données mesurées à différents pas de temps (généralement journaliers) en un enregistrement continu du débit et elles peuvent être simples ou complexes selon le régime d'écoulement de la rivière. Dans la plupart des situations, de nombreuses mesures sont nécessaires pour développer la relation niveau – débit aussi pour les basses et hautes eaux. Les mesures de débit manquent généralement dans la définition des extrémités supérieure et inférieure de la courbe de notation, d'où l'importance de la capacité de la courbe de tarage d'être appliquée dans des conditions de débit extrêmes.

Pour exprimer la relation niveau - débit sous forme d'une fonction dépendant de la dynamique fluviale, une estimation du débit permettant à la rivière de déborder dans la plaine inondable et de construire ses berges, a

été nécessaire. Ces processus liés au débordement sont toujours constatés à partir d'une certaine hauteur d'eau de la rivière, qui dépend de la morphologie locale, de la cinématique de la section (la répartition de la vitesse du courant). Dans notre étude, le changement des conditions hydrauliques entre la station hydrométrique de Podari et le site de la tranchée (qui se trouve à approximativement 300 m en aval de la station hydrométrique sur la rive droite de la rivière, alors que la station de mesure est située sur la rive gauche, ce qui peut amener des incertitudes supplémentaires dans la translation de la relation niveau – débit. Nous faisons quand même l'hypothèse des conditions hydrauliques et morphologiques similaires entre les deux sites, en ignorant les possibles effets hydrodynamiques sur le débit de la rivière induits par l'élargissement de la section en aval de la station de jaugeage, la nature de la turbulence et la distribution de la vitesse. Nous négligeons également la différence de pente entre les deux sites, ainsi que le comportement cinématique différent des écoulements turbulents et du transport (et leur accumulation éventuelle) de particules autour des dépôts sableux des berges [Liu *et al.*, 2010].

De nombreuses mesures sont nécessaires pour développer la courbe de tarage qui couvre aussi le régime de basses que des hautes eaux. Dans la plupart des cas, les mesures de débit manquent pour les extrémités supérieure et inférieure de la courbe, d'où l'importance de trouver des solutions qui permettent l'utilisation des courbes pour les valeurs extrêmes des débits, en minimalisant les erreurs. Dans ce bus, un premier pas dans l'analyse des courbes de tarage a été de vérifier la cohérence dans la partie haute des débits. Pour cela, nous avons:

- Analysé la courbe de tarage de 2010 et sa comparaison avec celle de 2014. On a trouvé que les deux courbes de tarage ne coïncident pas seulement dans la partie basse (en régime d'étiage), mais notamment dans la partie des hautes eaux (revoir la **Figure VII.7**). Cela pourrait être la conséquence d'un possible enfoncement général du lit du aux aménagement des barrages réservoirs dans les secteurs moyens et supérieur du bassin versant, des erreurs de mesures, de la mobilité du lit de la rivière d'une crue à l'autre, ou d'une année à l'autre.

- Chercher des possibles explications pour le changement de la relation niveau – débit en si peu de temps (4 ans) et des effets possibles des débordements (des couches déposées ?) ayant eu lieu durant chaque crue.

- Modéliser la courbe de tarage pour l'année 2010 pour le site de la tranchée, en prenant en compte les caractéristiques hydrauliques approximatives du lit de la rivière à partir des profils en travers valables pour la section de la station hydrométrique de Podari.

- Chercher les solutions finales pour l'approche de la relation niveau - débit à l'endroit de la tranchée : transfert de la courbe de Podari, vérification en utilisant l'HEC-RAS, variabilité de la relation en fonction des différents processus hydro-sédimentaires au cours des années à fortes crues.

- L'approche générale dans la relation niveau-débit-seuil-débordement est inversement chronologique. Premièrement, nous essayons de trouver le débit de débordement des plus hautes, voir plus récentes couches, dans l'hypothèse que chaque couche correspond à une seule crue. Les incertitudes sur les débits associés aux différentes couches, sur la relation niveau-débit à partir de la courbe de tarage d'une certaine année seront ainsi discutées. D'autres incertitudes découlent du fait que les couches ont été délimitées *in situ* sur la base

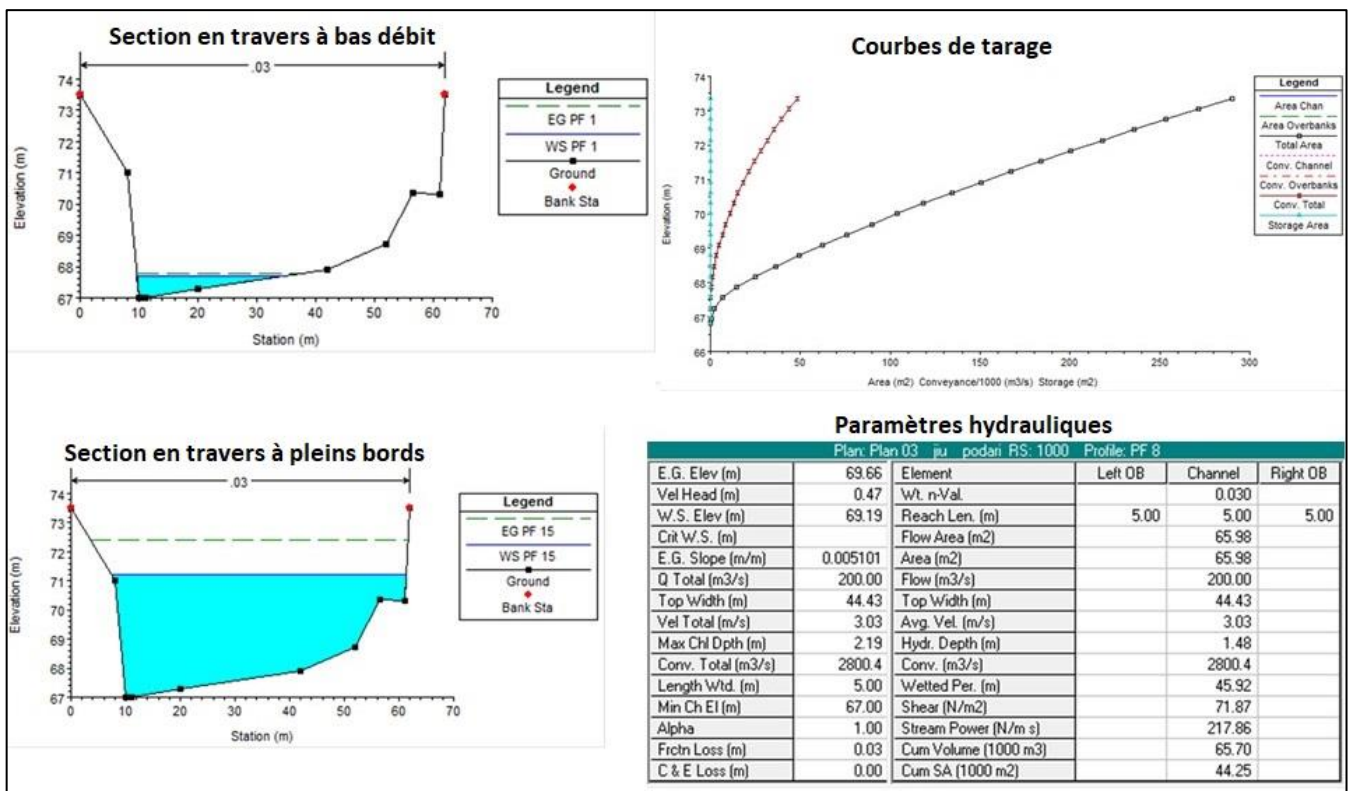


d'un jugement d'expert et elles devront de la sorte être confirmées par les analyses des propriétés des minéraux organiques et anorganiques qui les composent (§9).

- Dans la préparation de la phase de modélisation dans le milieu HEC RAS, une étude préalable de la relation niveau – débit autour des courbes de tarage pour les années 2010 et 2014 a été la réduction le plus possible des incertitudes de la courbe de tarage à la station Podari (différente chaque année, emplacement et installation de la station hydrométrique, niveau de confiance sur la partie haute de la courbe, discussion sur la dépendance de la morphologie du lit ou de la façon dont elle est extrapolée pour les hauts débits). À tout cela s'ajoute une discussion supplémentaire sur le transfert de la relation au site de la tranchée, avec l'hypothèse du régime uniforme.

- Dans l'environnement HEC-RAS, deux catégories de données d'entrée sont nécessaires : la géométrie du lit et la rugosité du fond de la rivière. La géométrie du lit inclut la définition est définie par des profils en travers le long du tronçon étudié de la rivière.

- Le nombre minimal de profils en travers dépend des caractéristiques propres au site, telles que l'uniformité de la section transversale, la linéarité du lit, la sinuosité du chenal, la variation de la pente longitudinale sur tout le tronçon d'étude. Dans notre cas, il n'y a pas de succession longitudinale de plusieurs profils, car on dispose seulement de la géométrie de la station hydrométrique de Podari mesurée. Ainsi, il a été nécessaire de considérer l'hypothèse de la même section transversale entre la station hydrométrique et la section au droit de la tranchée et d'estimer la pente entre les deux sections. La **Figure VII.13** montre un organigramme du modèle Hec Ras.



**Figure VII.13.** Schéma et flux de travail du modèle de la courbe de tarage dans Hec RAS au droit de la tranchée de Podari

En fonction des réglages paramétriques du modèle (géométrie considérée, la variation du coefficient Manning's « n » et de la courbe de tarage modélisée), le débit de débordement au droit de la tranchée à Podari se situe entre  $587 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $701 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . L'intervalle assez large obtenu témoigne de l'incertitude de la relation niveau-débit sur le site de la tranchée en aval de Podari, en raison de données hydrauliques et hydrologiques insuffisantes pour caler le modèle. Par conséquent, nous n'avons pas abouti à calculer avec précision le débit correspondant aux niveaux supérieurs de la berge. Il n'y a pas de moyen sûr de modéliser le débit de crue au niveau de la tranchée, même si nous considérons l'hypothèse d'un écoulement uniforme entre la h.s. de Podari et la tranchée. Un résultat utile qui peut être mentionné est qu'une relation stable entre le niveau et le débit est conservée pour les valeurs basses et moyennes, alors que pour les débits les plus élevés lors des crues, il est difficile de transférer cette relation au niveau de la tranchée, faute de données topographiques et de l'incertitude sur la partie haute de la courbe de tarage.

## 7.1.4. Sélection des crues débordantes

### 7.1.4.1. Considérations générales

Compte tenu des résultats des approches portant sur l'estimation du seuil de sélection des crues et les hypothèses formulées à partir de l'analyse de la relation niveau – débit, on approxime le seuil du débit de débordement à environ  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , qui correspond à un temps de retour entre 1 et 2,5 ans. Ce débit est inférieur à tous les débits de pointe enregistrés lors des épisodes de crue de l'année 2014, année où le niveau à atteindre pour submerger la couche précédemment déposée doit être le plus élevé. Le niveau de cette dernière couche a été atteint au moins une fois en 2014, comme l'illustre l'image aérienne du mois de mai 2014, lorsque toute la rive au droit de la tranchée a été submergée (*Figure VII.14*).



**Figure VII.14.** Mise en submersion de la berge lors de la crue de mai 2014 ( $Q = 859 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ;  $H = 857 \text{ cm}$ ). Le volume total de la crue (1-11 mai 2014) a été de  $4561 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

Sur la figure ci-dessus, nous voyons que le débit de  $859 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  correspond au niveau de la cote d'inondation de 400 cm. Maintenant, si nous supposons qu'il y a eu une seule crue débordante entre 2010 et 2014 et que cette crue ait été celle de mai 2014, en calculant la différence de niveau (la profondeur de la couche la plus jeune en fait), c'est-à-dire que, à partir de 224 cm, diminuée de 210 cm, il résulte 14 cm de dépôt d'une crue à traduire comme niveau sur la courbe de tarage. Le même raisonnement sera répété de manière consécutive pour les couches plus anciennes situées au-dessous de ces dernières. La hauteur de dépôt est toutefois une information indicative qui ne sera pas exploitée de manière rigoureuse. Nous rappelons que pour une bonne mise en relation entre l'épaisseur des couches et la quantité de matières en suspension, des mesures de la concentration des MES pendant les crues ne sont pas toujours disponibles.

L'établissement d'un seuil de débit aussi bas que  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  comporte encore des incertitudes :

- L'érosion et le dépôt se produisent dans les conditions d'une section qui n'est pas fixe ;
- La géométrie du lit dans la section de la tranchée analysée est différente de celle de la section en travers à la station hydrométrique de Podari ;
- L'hypothèse du régime uniforme est une approximation ;
- Les couches inférieures sont plus bas et le débit seuil de  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  n'est valable que pour la partie supérieure de la berge ; les couches plus anciennes auraient pu se déposer même en conditions de débits plus petits.

Le choix de ce débit seuil pourrait avoir comme inconvénients l'existence de crues avec des débits de pointe supérieurs au seuil, sans la capacité de dépasser le niveau de débordement pour déposer des sédiments.

A nouveau, d'autres hypothèses sur le site de la tranchée ont été formulées, en considérant les taux d'accumulation, la relation entre la cote de la plus haute (voire plus récente couche) et le niveau de l'eau en submersion pour la couche suivante, ainsi que le comportement morphogène ou pas des différentes crues :

1/ les couches plus profondes de la tranchée correspondent évidemment à des côtes de la berge/ niveaux de l'eau plus bas.

2/ le débit seuil de débordement sur le site de la tranchée pourrait être actuellement de  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Rappelons-nous dans le **Tableau VII.4** les différents résultats du calcul du seuil de débordement obtenus dans les démarches suivies. **Considérant tous les débits et les intervalles de débits obtenus et pour toutes les raisons évoquées ci-dessus, nous prendrons une marge de sécurité en sélectionnant toutes les crues avec de débits de points supérieurs à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .**

**Tableau VII.4.** Les débits seuils obtenus par les différentes méthodes

Débit seuil ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) selon différentes méthodes	Méthodes statistiques		Cote inondation	Débit à pleins bords		Modélisation Hec RAS
	Loi empirique (Weibull)	Loi théorique (Pearson III)	Courbe de tarage 2010	à s.h. Podari	250 aval de s.h. Podari	
	221 - 740	278 - 339	857	737,7 - 851,9	747,9 - 1007,8	587 - 701
$Q_b$	<b>445</b>	<b>302</b>	-	-	-	-

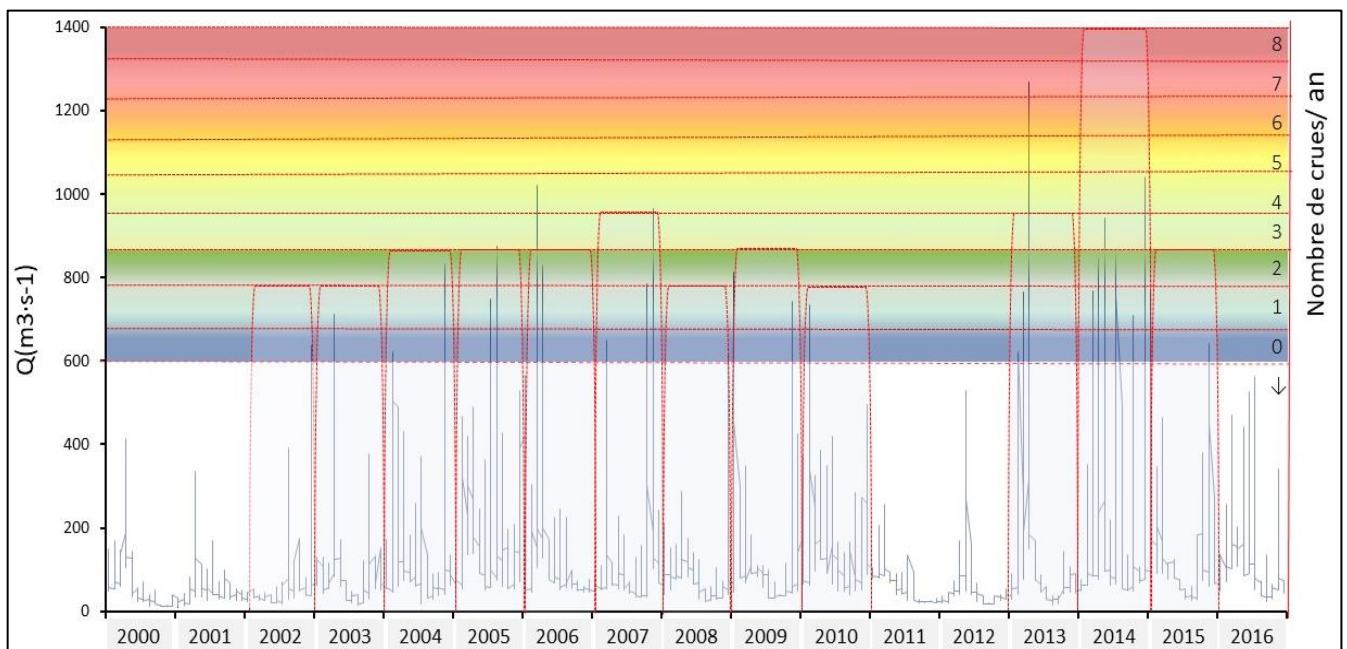
Les problèmes à résoudre comportent différents aspects. Même si nous avons choisi le débit seuil, nous n'arrivons pas encore à choisir une seule courbe de tarage à utiliser pour relier le niveau de chaque couche avec le niveau de l'eau et ensuite avec le débit « constructeur ». Nous avons vu seulement à travers de cette comparaison entre 2010 et 2014 les différences entre le débit de débordement pour les 2 années.

Les plus grandes crues ont une durée supérieure à une journée, comme les données journalières qu'on va utiliser pour leur sélection le montrent. Étant donnée la taille du bassin versant et les événements hydrologiques d'une durée de plusieurs jours, nous considérons que la chronique des crues plurijournalières correspond à notre analyse, sans avoir besoin de descendre à une échelle temporelle plus fine, sous-journalière. Il est à ajouter que tous les événements de crue sélectionnés pour l'analyse ont duré plusieurs jours, donc la résolution temporelle assez grossière des données de débit à notre disposition (valeurs quotidiennes moyennes) ne posait pas un gros problème méthodologique.

#### 7.1.4.2. Sélection des crues débordantes à la base du seuil

Compte tenu des différentes méthodes d'estimation du seuil de débit d'une crue débordante présentées au chapitre antérieur (modélisation de la relation niveau-débit à la base de la courbe de tarage, le calcul du débit à plein bord, l'estimation du débit de pointe minimal sur la base du temps de retour, ou la simple prise en compte du débit correspondant aux niveaux de seuils d'alerte établis par les services de gestion des bassins hydrographiques), le débit seuil a été finalement fixé à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Afin d'identifier les événements hydrologiques susceptibles à déposer des sédiments sur des berges, nous avons examiné la dynamique des débits journaliers de la période 2000 – 2016, pour laquelle nous avons eu des données (obtenus auprès de l'INHGA) (*Figure VII.15*).



**Figure VII.15.** Chronique des débits journaliers (2000 – 2016) et nombre de crues avec des débits supérieurs à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Compte tenu de la nature extraordinaire de l'année 2014, caractérisée par 8 crues potentiellement débordantes (avec des débits supérieurs à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), nous avons formulé l'hypothèse que dans les années suivantes (2015 et 2016) les crues n'auraient pu créer une nouvelle accumulation alluviale, car les débits n'ont pas été plus élevé ou moins proche du maximum enregistré en 2014 ( $1041 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  lors de la crue de décembre). Les deux crues de 2015 avec des débits maximaux supérieurs à la valeur seuil de  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ont atteint  $766 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (en janvier), et respectivement  $643 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (en novembre), par conséquent ces deux crues de 2015 n'ont pu pas déborder et déposer des alluvions sur la berge. Cette hypothèse est renforcée par le fait que la couche supérieure observée en juin 2017 semble plutôt bien fixée pour être plus récente que 2014. *Au total, 27 événements avec des débits de pointe<sup>31</sup> supérieurs à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ont été étudiés, durant la période 2001 - 2014.*

En vue de la séparation des crues, le débit de début de la crue a dû être au moins égal au débit moyen pluriannuel et le débit de la fin de la crue est situé entre le débit moyen pluriannuel et son double, étant donné que la plupart du temps, une crue est suivie d'une période avec des eaux plus hauts par rapport à son début [Meylan et Musy (1999); Pişota et Zaharia (2010)].

Il y a plusieurs raisons pour considérer la période 2001-2014 dans l'analyse des plus récentes couches :

1/ Etant donnée la date de la mise en œuvre de la tranchée (juin 2017), la dernière couche ne peut pas être plus récente ; nous considérons quelques années entre le présent et le moment du dépôt de la dernière couche (considérée pas plus récente que l'année 2014).

2/ En 2001, il n'avait pas de crue annuelle de débits supérieurs à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , donc la première année étudiée a été 2002.

3/Au-delà de 2014, nous n'avons pas considéré les années 2015-2016 car la chronique hydrologique à Podari montre deux crues en 2015 uniquement, avec des débits inférieurs à ceux de 2014 (**Figure VII.15**) qui ont certainement relevé la cote de submersion. La **Figure VII.15** a montré également que ces débits sont insuffisants, d'autant plus après les autres crues de 2014 qui ont certainement relevé la cote de submersion.

4/ Le caractère exceptionnel de l'année 2014 et le débordement de la rivière Jiu ont été confirmés par le témoignage d'un berger qui se souvient de la submersion de la zone riveraine ;

5/ Nous avons constaté sur le terrain que les dernières couches comportaient des racines et un degré de consolidation qui témoignent d'un âge supérieur à 1 an.

Dans le **Tableau VII.5**, nous montrons les crues avec le débit maximal supérieur à  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , qui auraient pu déborder et déposer des sédiments fins sur la berge de la rivière Jiu, en aval de la station hydrométrique de Podari. La colonne sur le temps de retour confirme que les plus petites inondations (celles avec des débits maximaux légèrement supérieurs au seuil de  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ont un temps de retour moyen un peu supérieur à 3 ans.

---

<sup>31</sup> En général, le débit de pointe est considéré celui instantané, obtenu de la série de débits mesurés à une haute fréquence temporelle (horaire, infra-horaire). Dans notre cas, nous avons appelé « débit de pointe » le débit maximum d'une crue parmi les débits moyens journaliers qui forment la série de valeurs des « n » jours de la durée de la crue.

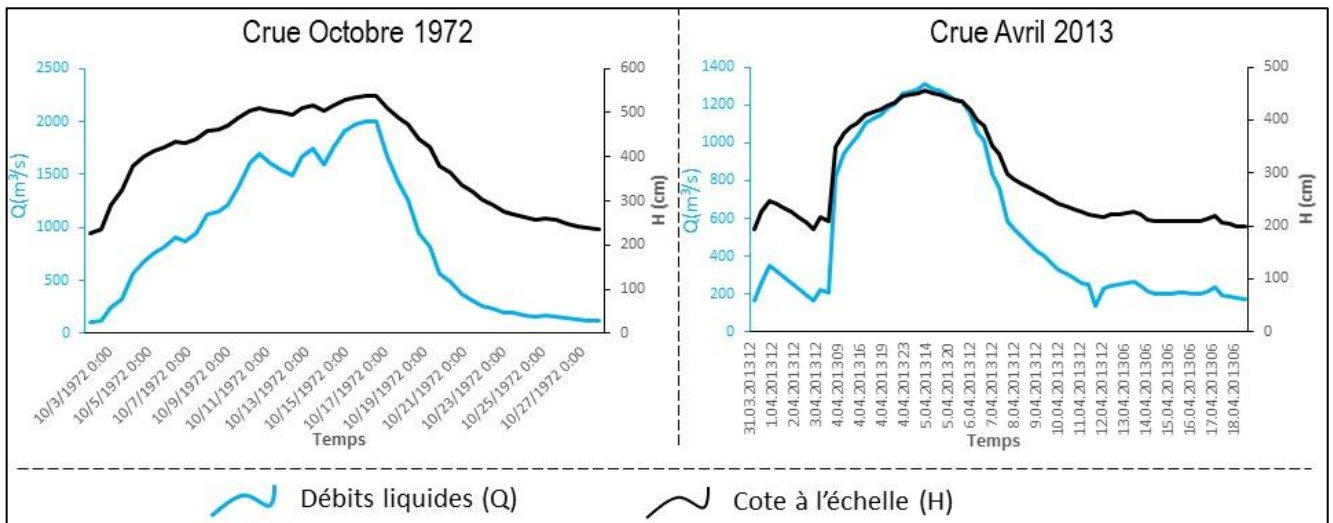


**Tableau VII.5.** Données sur les crues de la rivière Jiu, avec des débits de pointe supérieurs à 600 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (station hydrométrique de Podari, période 2002 - 2014)

Date début	Date fin	Durée (j)	Pointe de la crue		Temps de retour moyen	Cote à l'échelle (cm) pour Q <sub>max</sub>
			Date	Débit maximal (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )		
03/03/2014	13/03/2014	11	07/03/2014	809	7,83	337
17/04/2014	23/04/2014	7	20/04/2014	895	9,51	352
24/04/2014	30/04/2014	6	26/04/2014	847	8,65	355
03/05/2014	11/05/2014	9	07/05/2014	859	8,86	357
14/05/2014	25/05/2014	12	16/05/2014	944	14,8	376
27/07/2014	06/08/2014	11	30/07/2014	855	8,79	357
23/10/2014	31/10/2014	9	25/10/2014	743	6,8	324
02/12/2014	17/12/2014	16	11/12/2014	1074	44,5	397
25/02/2013	04/03/2013	8	28/02/2013	622	4,81	306
09/03/2013	21/03/2013	13	16/03/2013	766	7,21	337
30/03/2013	18/04/2013		20	05/04/2013	1270	91,35
18/02/2010	26/02/2010	9	21/02/2010	736	6,67	373
28/01/2009	05/02/2009	9	30/01/2009	813	8,04	391
08/11/2009	19/11/2009	12	12/11/2009	743	6,8	375
18/12/2008	26/12/2008	9	20/12/2008	617	4,77	395
23/03/2007	02/04/2007	11	25/03/2007	651	5,16	403
23/10/2007	01/11/2007	10	25/10/2007	786	7,56	435
16/11/2007	26/11/2007	11	20/11/2007	966	19,83	477
10/03/2006	21/03/2006	12	14/03/2006	1022	32,63	490
11/04/2006	19/04/2006	9	14/04/2006	830	8,35	445
10/07/2005	20/07/2005	11	14/07/2005	750	6,92	426
15/08/2005	03/09/2005	20	17/08/2005	875	9,15	455
27/02/2004	07/03/2004	10	28/02/2004	623	4,82	396
08/11/2004	13/11/2004	6	11/11/2004	640	4,98	400
14/11/2004	26/11/2004		13	17/11/2004	834	8,42
13/04/2003	25/04/2003	13	14/04/2003	713	6,26	428
03/12/2002	14/12/2002	12	07/12/2002	640	4,98	409

Les valeurs des débits et des cotes à l'échelle limnimétrique ont été tirées de la base de données de l'ABA Jiu ; les temps de retour ont été calculés avec la loi Pearson III à partir de la série de débits maximaux annuels à la station hydrométrique de Podari pour la période entière de mesurément (1950 – 2014). Le temps de retour pour les crues sélectionnées varie de 4,8 ans à 91,3 ans. Ces valeurs semblent être petites par rapport à ce qu'on s'attend d'un débit de débordement, mais il faut aussi tenir compte des aménagements de la rivière Jiu dans la période de fonctionnement de la station hydrométrique de Podari, qui doit avoir changé beaucoup la relation niveau – débit au cours des années. Si on compare le temps de retour de la plus grande crue de la période analysée (la crue de

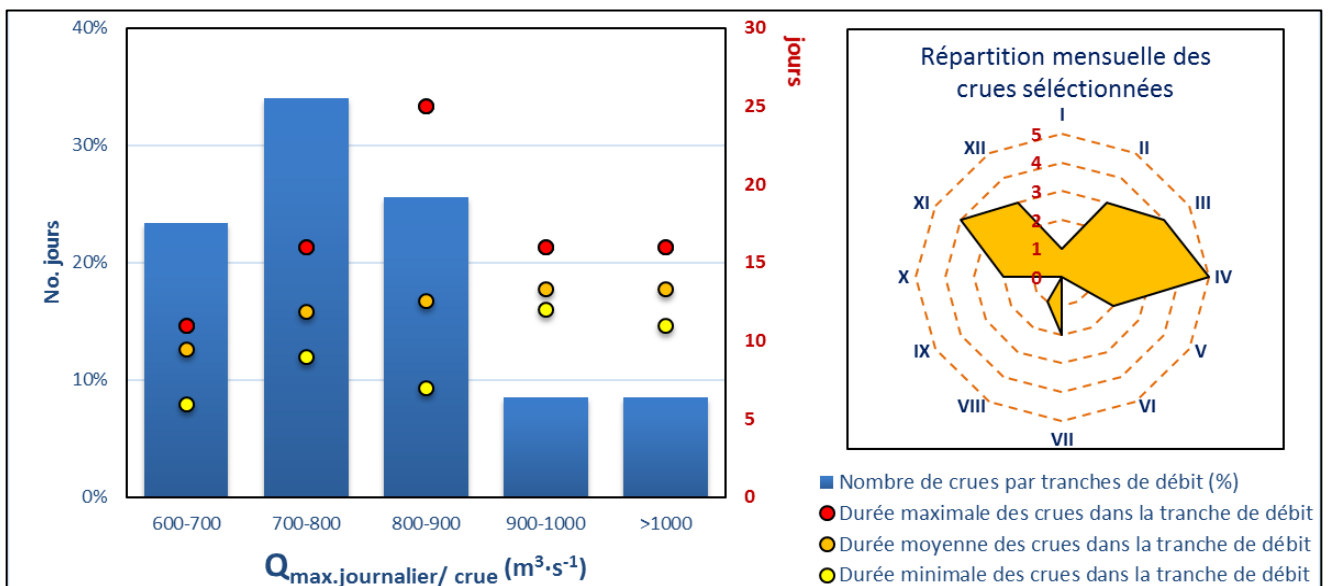
mai 2013) avec celui de la crue historique d'octobre 1972, les différences sont assez importantes, de 17,2 ans à plus de 200 ans, alors que les débits maximaux journaliers diffèrent de moins de 700 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (**Figure VII.16**).



**Figure VII.16.** Les hydrogrammes de crue (au niveau horaire) des crues d'octobre 1972 et d'avril 2013

Dans le même **Tableau VII.5**, nous avons également noté les niveaux (cm) à l'échelle limnimétrique correspondant aux débits maximaux pour les 27 crues. On peut observer qu'ils n'augmentent pas toujours directement proportionnel avec le débit, car durant la période analysée, le lit de la rivière Jiu a probablement subi différents changements géomorphologiques, ce qui a conduit à la modification de la section mouillée par enfoncement ou variation du niveau de base par enfoncement ou aggradation de sorte qu'aucune correspondance ne peut être établie directement entre le niveau de l'eau et la hauteur du front de la berge.

La plupart de crues analysées ont eu des débits de pointe de 700 – 800 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, tandis que les plus grandes (avec des débits supérieurs à 1000 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) ont été moins fréquentes (**Figure VII.17**).



**Figure VII.17.** Nombre des jours à  $Q_{moyen,journalier}$  (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) > 600 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> par tranches de débit en relation avec la durée de la crue (à gauche) et répartition mensuelle des crues sélectionnées (à droite)

Les 27 crues qui ont été sélectionnées sur la base du seuil de débit de 600 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>.

## 7.2. Jeux de données et critique

Avant de procéder à l'analyse des crues potentielles à avoir débordé, il faut vérifier la validité, la cohérence et la disponibilité des séries de données de débits. Nous avons fait en détail la critique des données des débits, tant liquides que solides, dans le chapitre §5.1, en apportant des informations sur le protocole de mesure, sur les institutions responsables et sur les incertitudes liées à l'estimation des débits journaliers à la base de ces mesures. Dans ce chapitre, nous allons apporter quelques précisions supplémentaires seulement, afin de justifier le choix des stations hydrométriques et de la période d'analyse des crues.

### 7.2.1. La cohérence des débits amont - aval

A l'heure actuelle on dispose de données très nombreuses sur le bassin de la rivière Jiu, la plupart d'entre eux ayant de longues séries de débits, de plusieurs dizaines d'années. Dans cette démarche de relier les couches alluviales déposées à Podari avec les crues qui les ont transportées et les sous-bassins contributifs, nous avons donné priorité à la période récente (après 2000), en assumant le risque qu'il va y avoir forcément des couches à partir d'une certaine profondeur qui ont été déposées avant et dont les événements de crue on ne pourra plus identifier. Du point de vue spatial, ce qui nous intéresse en premier lieu sont les crues les plus récentes aux stations les plus en aval (on va travailler dans un premier temps sur les gros sous-bassins, on raffinerait ensuite si nécessaire pour les sous-bassins de ces affluents de la Jiu). La référence avec la tranchée sera toujours faite à la base de la relation niveau-débit pour la station hydrométrique de Podari.

Nous avons vérifié la stabilité des chroniques de débits liquides journaliers en analysant la cohérence amont-aval par le biais des bilans à l'échelle de l'année et à l'échelle de la crue.

Pour cela on est parti de deux études de cas au niveau annuel et de la crue : année 2007, respectivement les crues d'octobre et novembre 2007, qui ont été unes des plus grandes des toute l'histoire des années.

Le **Tableau VII.6** présente les valeurs cumulées et le rapport avec la contribution « morphométrique », considérée de référence, en fonction de la superficie de chaque sous-bassin versant.

**Tableau VII.6.** Données hydrologiques analysées pour l'année 2007

Rivière	Station	Q moyen 2017 (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	BV (km <sup>2</sup> )	% surface	Vannée (mil. m <sup>3</sup> )	% volume annuel	Lame d'eau ruisselée (mm)	15 au 23 novembre 2007 (mil. m <sup>3</sup> )
Jiu	Filiași	68.5	5289.1	57%	2159	72%	408	190.30
Motru	Fața Motrului	9.8	1741.2	19%	309	10%	177	70.20
Amaradia	Albești	2.9	884.7	10%	92	3%	104	20.05
Gilort	Turburea	13.0	1099.6	12%	410	14%	373	39.41
<b>complément</b>		<b>0.9</b>	284.0	3%	30	1%	<b>105</b>	39.41
<b>somme</b>			<b>9299</b>		<b>2999</b>		<b>323</b>	<b>359</b>
Jiu	Podari	95.1	9299.9		2999		322	291.17
						68.19		

Dans l'analyse de la cohérence des données hydrométriques on a considéré un bassin versant complémentaire pour représenter la différence de superficie entre la somme de 4 stations amont et Podari. On a calculé ensuite le débit moyen de ce bassin complémentaire. On pourrait aussi considérer les incertitudes sur les débits de chaque station. On a fait ce type de vérification aussi à l'échelle d'un événement, en prenant la crue de novembre 2007.

Pour l'analyse de la cohérence des données sédimentaires, on pourra raisonnablement faire l'hypothèse dans un premier temps qu'il n'y a pas de stockage ni déstockage à l'échelle d'une année. En cas d'incohérences sur le bilan sédimentaire, il faut mettre en cause en premier lieu la donnée de débits d'alluvions en suspension, sur comment ils ont été calculés (en particulier la fréquence de la mesure de concentration). Nous avons montré au chapitre §5.1.2 que les valeurs des débits d'alluvions en suspension mesurés semblent être corrélées avec ceux obtenues par la relation débit liquide – débit solide, mais on n'a pas beaucoup de mesures en crue, ce qui introduit des incertitudes sur les quantités d'alluvions transitées lors des événements extrêmes. A tout ça, nous pouvons aussi mentionner l'effet des stockages intermédiaires entre les stations hydrométriques des affluents et celle de la Jiu à Podari, ce qui nous empêche à suivre la même analyse de bilan (somme apports amont par rapport au débit solide à Podari), comme dans le cas des séries de débits liquides.

On se pose ensuite quelques questions sur les différences de débits entre amont et aval pour le cas de la station hydrométrique Podari.

1. En ce qui concerne la variabilité spatiale (du comportement hydrométrique dans un premier temps, de la production sédimentaire si l'analyse de la cohérence est satisfaisante) de la lame d'eau ruisselée à l'échelle annuelle, reflète-t-elle la variabilité climatique, des terrains, des pentes ?

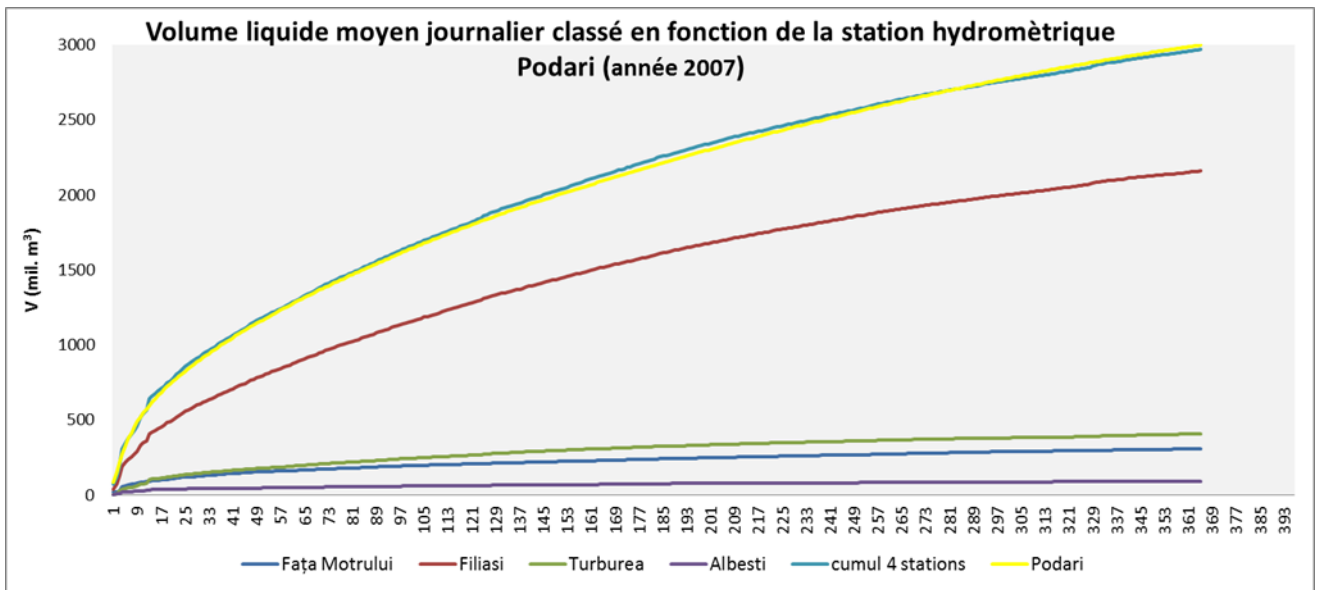
2. Que se passe-t-il pour les grosses crues (celles que l'on pense utiles pour l'analyse des dépôts) ?

En ce qui concerne les événements de crue, elles pourraient amener des réponses si bien choisies. On a sélectionné les crues d'octobre et novembre 2007 et on compare les volumes cumulés (*Figure VII.18*).

La somme des affluents (sans BV complémentaire) dépasse le volume Podari. On vérifie en traçant le cumul que la crue est terminée.

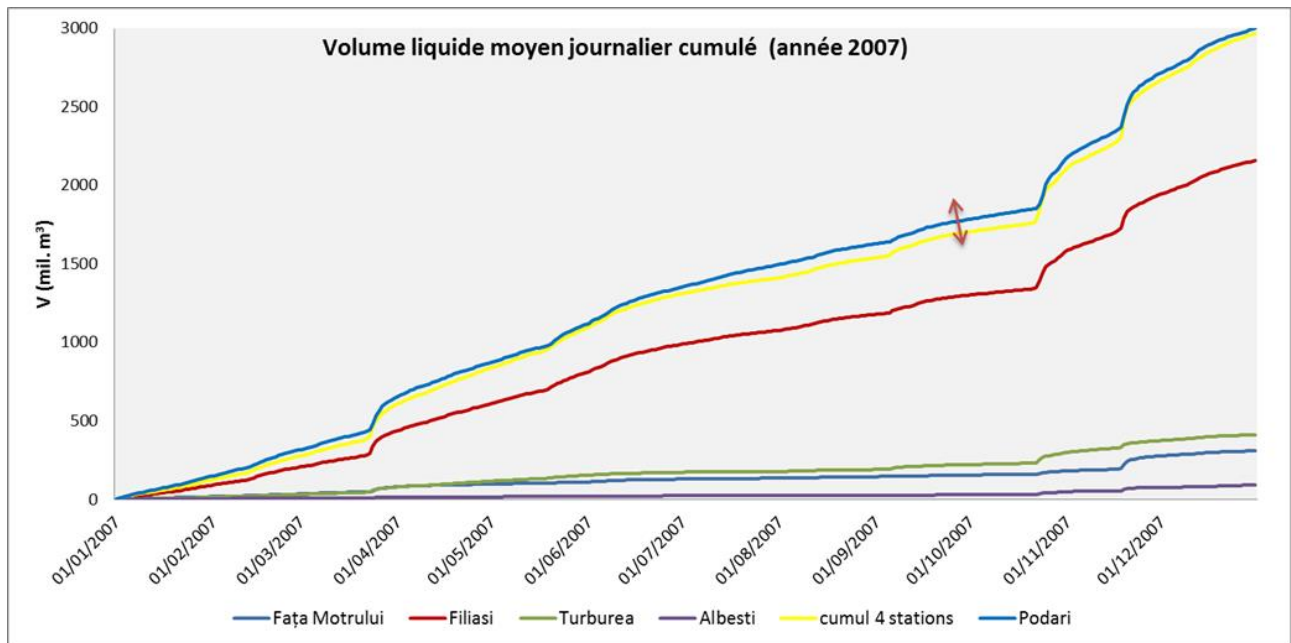
- *Explication possible 1* : débordement et stockage dans la plaine inondable. --> à vérifier sur historique du débordement
- *Explication possible 2*: écrêtement dans le lac Işalnița / volume de stockage 1,4 mil. m<sup>3</sup> selon Hydroelectrica S.A.
- *Explication possible 3* : erreur sur la partie haute des courbes de tarage.

Le débit cumulé des 5 stations donne aussi des informations précieuses sur la contribution de chaque bassin versant au ruissellement de l'eau à Podari. Le même type d'exercice peut se faire aussi pour les débits solides, mais dans ce cas-ci il faut plus investiguer la confiance dans les valeurs de MES pendant les crues.



**Figure VII.18.** Contribution de chaque bassin versant par rapport au débit à Podari. Un complément de bilan été aussi calculé

La **Figure VII.19** est un bon exemple de comment les différents sous-bassins contribuent à la croissance du débit en aval et lesquelles montrent une hausse du débit par rapport à l'échelle annuelle de temps, en comparaison avec la station Podari, située le plus en aval.



**Figure VII.19.** Courbe des volumes cumulés des 5 stations étudiés pour l'année 2007

Au niveau de la crue de novembre 2007, nous observons aussi que le cumul des stations amont est supérieur au volume à la station de Podari en aval (**Figure VII.20**). Le reste du volume a probablement été stocké dans la plaine alluviale ou écrêté par le réservoir d'Ișalnița (on ne sait pas s'il a été fonctionnel à ce moment).



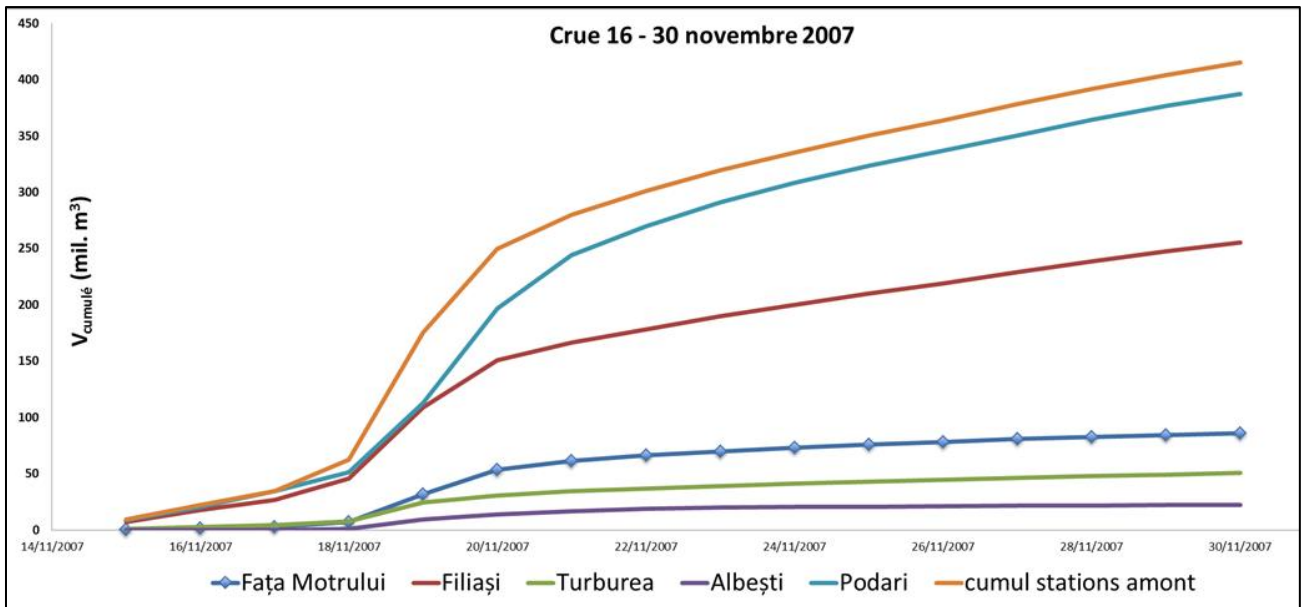


Figure VII.20. Le bilan des débits liquides de la crue de novembre 2007

En perspective, 3 hypothèses restent à explorer :

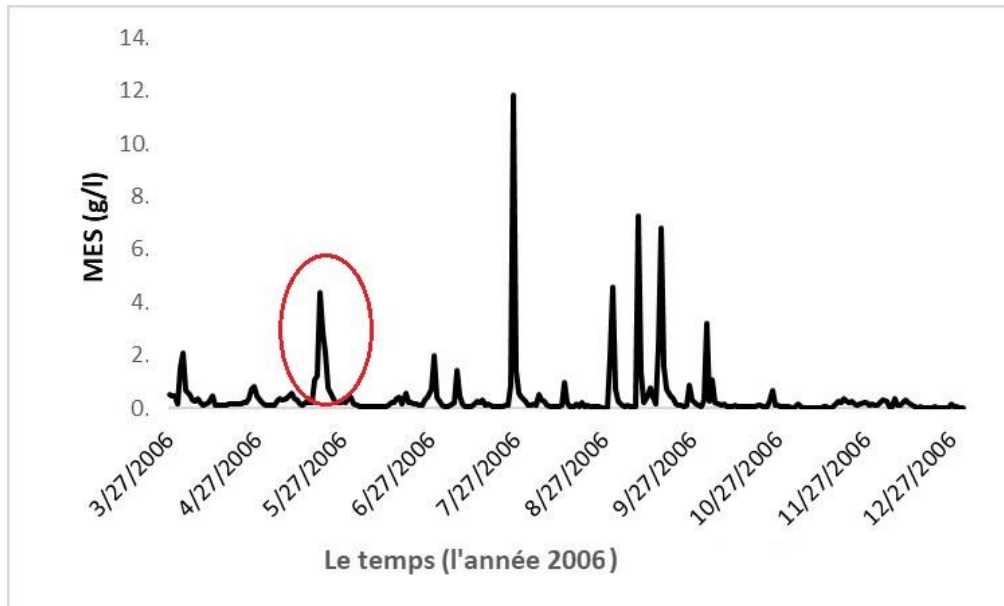
- ? **H1.** En crue, le débit à Podari est sous-estimé par rapport au cumul qui vient de l'amont + le b.v. complémentaire ?
- ? **H2.** Pendant les bas débits, est-ce qu'on s'écarte trop vite ?
- ? **H3.** Rechargement des nappes ? La rivière a-t-elle perdu de l'eau entre amont et aval ?

### 7.2.2. Validité des données de transport solide

Dans l'essai de trouver les sources potentielles de sédiments fins, on rappelle qu'on s'intéresse du transport en suspension, qui dépendent toutefois des processus d'érosion, de la pluie, du débit liquide et de sa capacité de transport. Des mesures de la concentration pendant les différents épisodes de crues seraient donc utiles. Malheureusement, les chroniques disponibles (pour certaines crues et pour certaines stations) ne sont pas utilisables parce qu'elles ont été élaborées à partir de mesures de concentration réalisées à un pas de temps de l'ordre d'une semaine à un mois, ce qui ne prend pas en compte ce qui se passe en crue. En effet, pour cette taille de bassin versant, la concentration de matières en suspension peut varier très rapidement au cours de la crue. Nous prenons l'exemple de la rivière Isère, affluent du Rhône dans les Alpes Françaises, pour laquelle on a trouvé des débits des alluvions en suspension mesurés au niveau infrajournalier, même au pas de temps infrahoraire. La rivière Isère est comparable en taille du bassin versant avec la Jiu et aussi en termes de la durée d'une crue (7 – 20 jours pour les plus fortes).

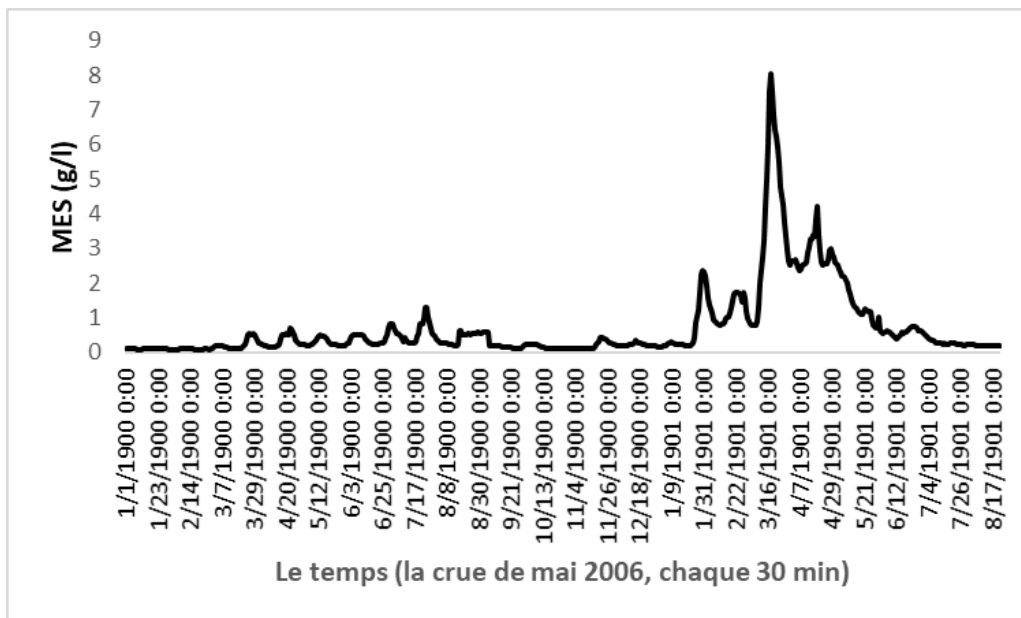
En analysant les concentrations des alluvions en suspension (MES) au niveau journalier (*Figure VII.21*) et horaire/ infrahoraire (*Figure VII.22*) à la station Grenoble Câmpus de la rivière Isère, nous observons la variation importante des quantités d'alluvions transférées dans peu de temps. Pendant une journée, il y a des moments avec une forte intensité du transport sédimentaire, qu'on ne peut pas capturer dans les valeurs moyennes

d'une journée, d'autant moins si ces valeurs ne proviennent pas de vraies mesures, mais elles ont été obtenues à la base de la relation avec le débit liquide.



**Figure VII.21.** La chronique des concentrations des alluvions en suspension (MES, g/l) au niveau journalier de l'année 2006 à la station Grenoble Campus sur la rivière Isère

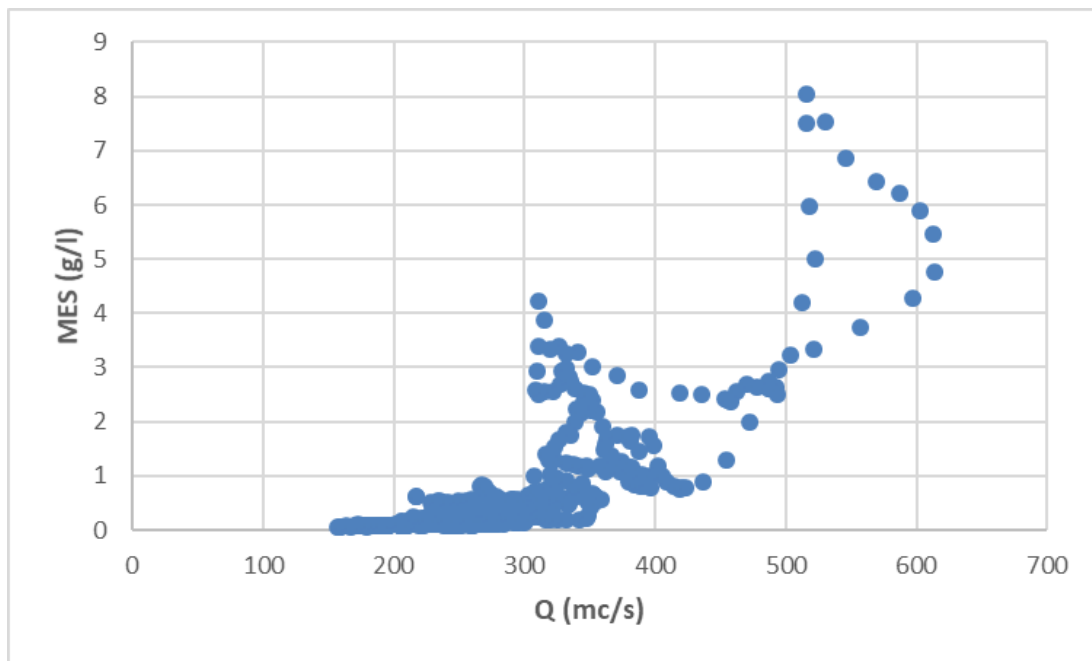
Les valeurs des MES varient beaucoup au niveau de l'année et l'on constate aussi sur la chronique journalière que notamment sur celui horaire (*Figure VII.22*).



**Figure VII.22.** La chronique des concentrations des alluvions en suspension (MES, g/l) chaque 30 min pour la crue de 1 – 25 mai 2006 à la station Grenoble Campus sur la rivière Isère

Nous observons que la concentration des alluvions en suspension est très variable durant la journée, avec des différences d'une heure à l'autre de plus de 7 g/l. Si on essaie de calculer une valeur moyenne journalière avec ces débits infrahoraires, on va perdre de l'information sur la contribution en termes de matières en suspension

de la rivière. Si on étudie aussi la relation débit liquide – débit solide durant cette crue, nous n’allons pas trouver une corrélation parfaite, ce qui met sous la question l’estimation des concentrations des matières en suspension durant les crues à partir de quelques mesures réelles le long de l’année (*Figure VII.23*). La relation n’est pas de toute linéaire si non de type hystérétique, ce qui met en évidence les différentes sources des alluvions et les valeurs des MES qui ne varient pas en toute dépendance avec ceux des débits liquides, comme on aurait attendu.



**Figure VII.23.** La relation hystérétique entre la concentration des alluvions en suspension (MES, g/l) et les débits liquides (Q, mc/s), chaque 30 min pour la crue de 1 – 25 mai 2006 à la station Grenoble Campus sur la rivière Isère

Etant donnée cette relation compliquée entre les débits liquides et les débits solides durant les crues (mais pas seulement), nous prenons des réserves dans l’utilisation des flux de matières en suspension pour estimer l’apport des différents sous-bassins. Des facteurs plus complexes entrent en cause dans ce type de relation (proximité ou disponibilité supplémentaire des sources d’alluvions lorsque le débit liquide n’évolue pas nécessairement, ou par contre un appauvrissement des matières fines qui pourrait être mises en mobilisation pour un débit liquide élevé).

Dans le cas des données de débits des alluvions en suspension au niveau du bassin de la Jiu, nos flux solides sont incohérents, parce que leur « fabrication » dépende du débit liquide. Dans le *Tableau VII.7* on reprend l’exemple de la crue de novembre 2007, en analysant cette fois le flux massique entre la station hydrométrique de Podari et les stations des rivières affluentes (Fața Motrului, Gilort et Filași sur la Jiu amont). On voit clairement qu’il n’y a pas de cohérence entre les apports de l’amont et ce qu’on a mesuré ou estimé en aval. Par contre, pour la crue de juillet 2005, la somme des flux massiques de l’amont semble être cohérente avec ce qu’on enregistre en aval à la s.h. Podari.

**Tableau VII.7.** Deux exemples contraires de l'analyse de bilan du flux massique pour les crues de juillet 2005 (avec des MES mesurés) et de novembre 2007 (avec des MES estimés)

Rivière	Station	Qmoyen 2017 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	BV (km <sup>2</sup> )	% surface	% volume cruce	Flux massique moyen (kg/s)
Jiu	Rovinari					
Jiu	Filiași	68.5	5289.1	57%	59%	35.7
Motru	Fața Motrului	9.8	1741.2	19%	22%	7.7
Amaradia	Albești	2.9	884.7	10%	6%	
Gilort	Turburea	13.0	1099.6	12%	12%	22.5
complément		0.9	284.0	3%	0%	
<b>somme</b>			<b>9299</b>			
Jiu	Podari	95.1	9299.9			33.5

La crue de juillet 2005 est parmi les peu nombreux épisodes de crue avec des débits des alluvions en suspension mesurés (la moyenne journalière), ce que nous donne un meilleur aperçu sur les quantités d'alluvions en suspension transitant la station de mesure en cause.

Toutefois, en manque de données des alluvions en suspension mesurées pour chaque événement de crue, nous ne pouvons pas aborder la dynamique du transport solide, car il n'est pas suffisant de mesurer 12-20 fois par an la vraie concentration et à cette base obtenir des estimations sur les flux de matières en suspension pendant les crues.

### 7.3. Les crues débordantes : de quels sous-bassins ?

#### 7.3.1. Sélection des stations hydrométriques

Afin d'analyser la contribution de différents sous-bassins versant de la rivière Jiu à la formation des crues, le bassin de la Jiu est décomposé en trois niveaux, chacun avec les stations hydrométriques de référence (**Tableau VII.8** et **Figure VII.24**). Par la suite, au chapitre 10, les apports de crues seront estimés sur la base des caractéristiques géochimiques des sédiments dans les sous-bassins ainsi déterminés.

**Tableau VII.8.** Les stations et niveaux d'analyse

Station hydrométrique	Rivière	Acronyme
<i>Niveau 1 – station référence aval - Podari (PJ)</i>		
Podari	Jiu	PJ
Fața Motrului	Motru	FM
Scăiești	Argetoaia	SA
Breasta	Raznic	BR
Albești	Amaradia	AA
Filiași	Jiu	FJ
Bassin intermédiaire		B.I.1
<i>Niveau 2 – station référence aval - Filiași (FJ)</i>		
Filiași	Jiu	FJ

Vaidei	Șușița	VS	
Godinești	Tismana	Bassin	GT
Telești	Bistrița	Tismana	TB
Celei	Orlea	(TT)	CO
Stolojani	Runcu		SR
Turceni	Jilț	TJ	
Tulburea	Gilort	TG	
Sadu	Jiu	SJ	
Bassin intermédiaire		B.I.2	
<i>Niveau 3 – station référence aval Sadu (SJ)</i>			
Sadu	Jiu	SJ	
Iscroni	Jiu de l'Ouest	IJO	
Livezeni	Jiu de l'Est	IJE	
Bassin intermédiaire		B.I.3	

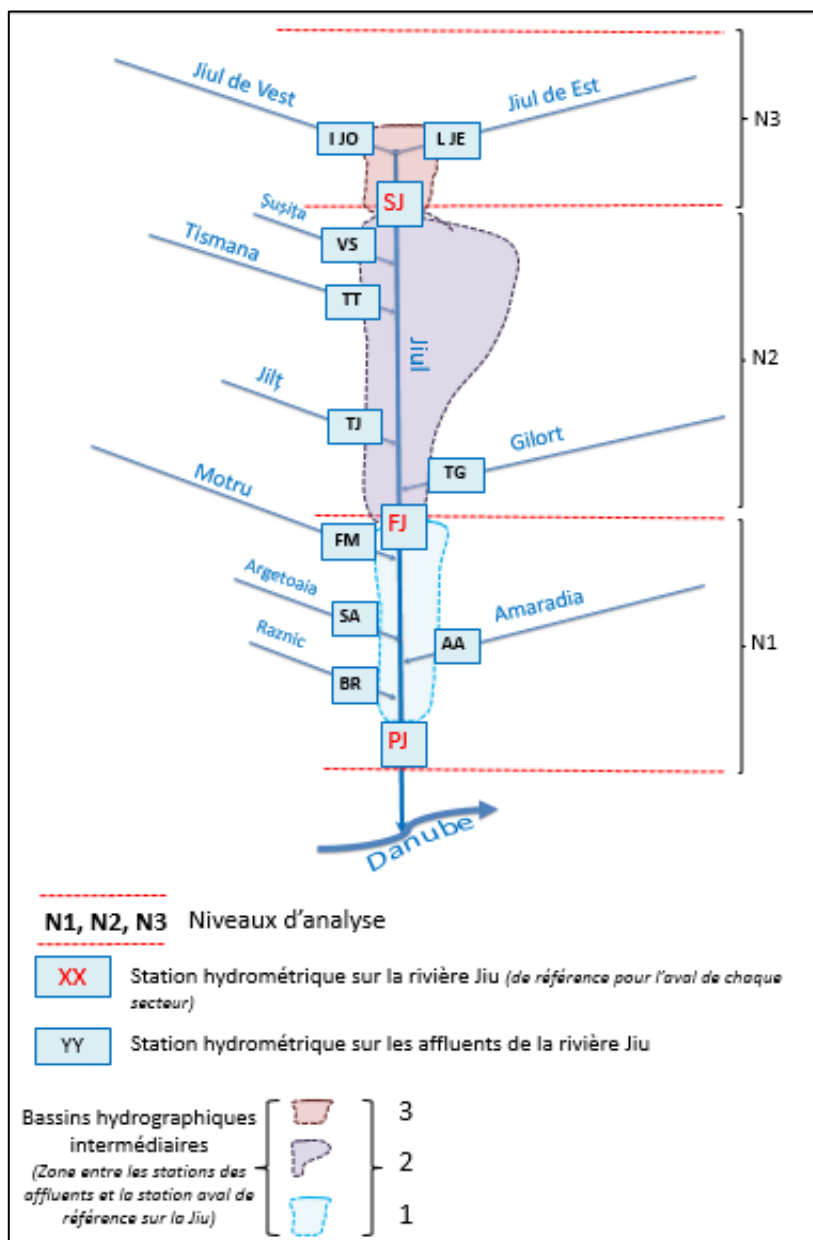
Les couleurs utilisées pour marquer les niveaux d'analyse et les stations intermédiaires correspondent aux couleurs du schéma de la **Figure VII.24**.

Il convient de noter que le passage à un niveau supérieur (par exemple de 1 à 2) sera analysé lorsque l'indicateur en cause montre une contribution significative. Dans ce cas, l'analyse ira plus loin au niveau suivant afin de rechercher d'autres entrées possibles provenant des bassins affluents localisés dans les niveaux supérieurs. Même si dans la plupart des crues nous devons passer au niveau 2, il faut d'abord bien étudier les volumes des affluents du premier niveau.

En ce qui concerne la situation du bassin de la rivière Tismana, étant donné qu'il n'y a plus de station hydrométrique près de l'embouchure, nous allons avoir considéré un débit général provenant de ce bassin, deux méthodes de l'estimer étant à notre disposition : a. Nous utilisons la somme des volumes provenant des rivières avec des stations de mesure des débits (r. Tismana amont à s.h. Godinești + r. Bistrița à s.h. Telești + r. Sohodol/Runcu à s.h. Stolojani + r. Orlea à s.h. Celei), pour approximer les apports de ce bassin ; b. nous essayons de modéliser les débits sur la rivière Tismana, en s'appuyant sur les débits dans la période commune de fonctionnement des stations hydrométriques de Godinești (amont) et Călnic (aval, près de l'embouchure avec la Jiu, station actuellement non plus fonctionnelle).

Les principales caractéristiques des rivières analysées et de leurs bassins versants sont résumées dans le **Tableau VII.9**. Ces caractéristiques montrent un aspect essentiel dont il faut tenir compte dans l'inclusion ou pas des sous-bassins dans l'analyse. Ainsi, le débit moyen pluriannuel n'est pas toujours directement proportionnel à l'altitude et à la surface du bassin (comme nous avons pu le voir au chapitre §5.4), alors qu'un débit moyen pluriannuel apparemment faible peut être associé à une station donnée à des débits maximaux beaucoup plus élevés (comme c'est le cas de la station Breasta sur la rivière Raznic, d'un débit moyen annuel de moins de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , avec des débits maximaux qui peuvent dépasser  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  lors de certaines crues). En conclusion, il faut prendre tous les sous-bassins contribuant à la formation des crues sur la rivière Jiu, quelle que soit leur taille.





**Figure VII.24.** Schéma des niveaux d'analyse de la contribution des sous-bassins versant de la rivière Jiu à la formation des crues

**Tableau VII.9.** Caractéristiques générales des rivières sélectionnées et de leurs bassins versants

Rivière	Station hydrométrique	Débit moyen annuel ( $m^3s^{-1}$ )	Débit max journalier ( $m^3s^{-1}$ )	Superficie du b.v. ( $km^2$ )	Altitude moyenne (m)	Position par rapport à la rivière Jiu	Niveau analyse
Raznic	Breasta	0,93	134,4	475	201	D	N <sub>1</sub>
Argetoaia	Scăiești	0.35	56,6	249,7	227,67	D	N <sub>1</sub>
Amaradia	Albești	2,15	293,3	859	273	G	N <sub>1</sub>
Motru	Fața Motrului	12,78	917,6	1700	384	D	N <sub>1</sub>
Jilț	Turceni	1,1	80,3	376	540	D	N <sub>2</sub>
Gilort	Turburea	10,2	377,3	1027	590	G	N <sub>2</sub>
Tismana	Câlnic	9.19	314	387	356,82	D	N <sub>2</sub>
Bistrița	Telești	4,23	135	270	540	D	N <sub>2</sub>

Runcu	Stolojani	3,06	111,2	154	851	D	N <sub>2</sub>
Șușița	Vaidei	2,17	43,8	79	1055	D	N <sub>2</sub>
Jiu de l'Est	Livezeni	7,73	104,2	460	1256	G	N <sub>3</sub>
Jiu de l'Ouest	Iscroni	10,29	340,5	502	1134	D	N <sub>3</sub>
Jiu	Podari	84,57	1940,4	9253	446	Aval	N <sub>1</sub>
Jiu	Filiași	63,65	1434,5	5239	563	Amont/ Aval	N <sub>1</sub> / N <sub>2</sub>
Jiu	Sadu	20,26	246,7	1255	1066	Amont/ Aval	N <sub>2</sub> / N <sub>3</sub>

### 7.3.2. Bases de données. Limites d'exploitation

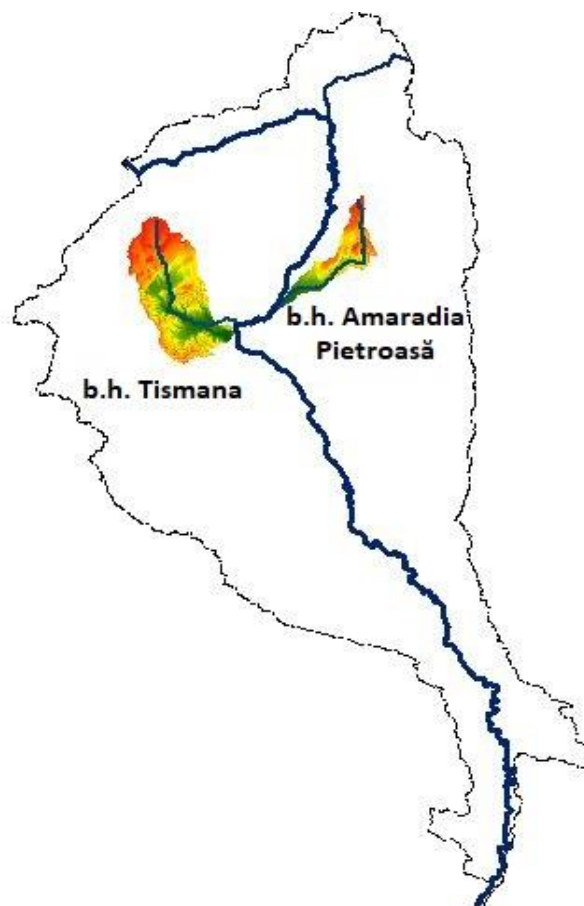
Pour l'analyse des crues potentielles au débordement nous avons utilisé les débits moyens journaliers de certaines stations hydrométriques de la rivière Jiu, ainsi que d'un nombre d'affluents de premier ordre. Nous avons choisi les stations hydrométriques sur les affluents principaux qui étaient situées le plus en aval, près des embouchures, comme on verra dans le chapitre §7.2. Les données hydrologiques utilisées proviennent de l'ABA Jiu et de l'INHGA et s'étendent sur une période de 14 années (2001 – 2014).

Nous nous sommes concentrés sur la période d'analyse la plus récente, après 2000, pour étudier les dernières crues possibles qui auraient pu déposer les (dernières) couches de sédiments à la tranchée de Podari. La contrainte était que certains affluents de premier ordre de la rivière Jiu ne disposent pas de stations hydrométriques fonctionnelles pendant cette période. Par exemple, la rivière Tismana, qui draine un bassin versant de 800 km<sup>2</sup>, ne possède qu'une seule station hydrométrique située plus loin de la confluence avec la Jiu (s.h. Godinești), alors que dans son secteur aval, elle reçoit la contribution de deux affluents importants, Runcu et Bistrița, le débit entre la station Godinești et l'embouchure de la rivière Jiu restant inconnu. Une situation similaire concerne l'affluent Amaradia Pietroasă (voir les caractéristiques hydrologiques et morphométriques dans l'*Annexe 6*), qui se rejoint la Jiu du côté opposé de la confluence avec la Tismana, et qui ne possède pas de station hydrométrique fonctionnelle, sauf pour une station située très en amont (s.h. Ohaba), ce qui n'est pas représentative pour l'ensemble de son bassin. Les deux bassins versants sont illustrés dans la *Figure VII.25*.

La prise en compte des apports en volume d'eau de la part des bassins de ces deux affluents est cruciale :

1. Les bassins versant des rivières Tismana et Amaradia Pietroasă drainent toute la partie subcarpatique du bassin de la Jiu, qui s'étend sur plus de 1000 km<sup>2</sup> (voire 1/10 du territoire du bassin de la Jiu). Par conséquent, même si on ne connaît a priori leurs contributions en termes de volume d'eau, on ne peut pas les manquer dans cette démarche.
2. Le bassin de la rivière Tismana présente deux particularités qui peuvent influencer l'écoulement pendant les crues : les aménagements (voir plus d'informations sur le système hydro énergétique Valea Mare dans §3.9) et le karst. Ainsi, toute estimation de la contribution volumique de ce bassin par rapport à sa taille peut être erronée, si on prend juste ce critère de superficie en considération.

3. Par contre, la rivière Amaradia Pietroasă a un débit moyen annuel très faible ( $<1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), qui n'est pas proportionnel avec la contribution attendue du rapport des superficies entre son bassin versant et celui de la Jiu.



**Figure VII.25.** Les bassins versant des rivières Tismana et Amaradia Pietroasă

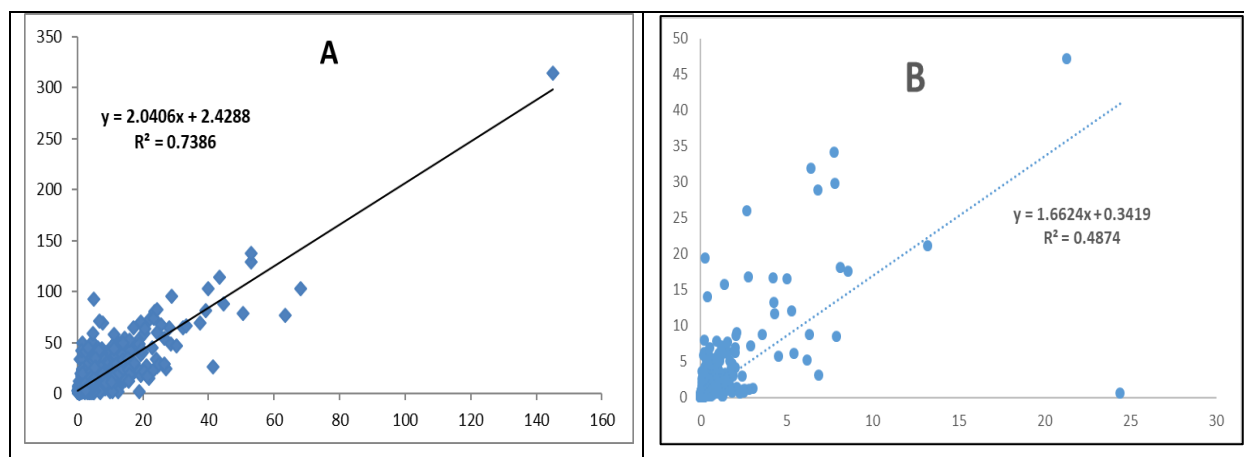
Pour toutes ces raisons, on considère qu'il serait plus prudent prendre en compte les débits de ces deux rivières. On récapitule les données dont on dispose, pour ensuite présenter la démarche d'acquisition de nouveaux débits pour la période d'analyse 2001 – 2014 (**Tableau VII.10**).

**Tableau VII.10.** Les données dont on dispose pour les rivières Tismana et Amaradia Pietroasă

		<b>B.V. de la Tismana</b>	<b>B.V. de l'Amaradia Pietroasă</b>
<b>Stations hydrométriques fonctionnelles</b>	<i>Nom</i>	Godinești	Ohaba
	<i>Distance de la confluence</i>	23,1 km	26,1 km
	<i>Période de fonctionnement</i>	1954 – présent	1988 - présent
<b>Stations hydrométriques fermées</b>	<i>Nom</i>	Câlnic	Iasi-Gorj
	<i>Distance de la confluence</i>	4,9 km	1,2 km
	<i>Période de fonctionnement</i>	1968 – 1998	1988 - 1998

Nous disposons d'une période commune de 30 ans pour les stations de la rivière Tismana (1968 – 1998) et de 10 ans pour les stations de la rivière Amaradia Pietroasă. Nous avons vérifié la corrélation entre

s.h. Călnic et Godinești, respectivement entre s.h. Iasi – Gorj et Ohaba (**Figure VII.26**) et nous avons obtenu des bons coefficients de relation (Pearson r).



**Figure VII.26.** Corrélations linéaires entre les débits sur les périodes communes des stations hydrométriques : A. Călnic et Godinești (rivière Tismana), respectivement B. Iasi – Gorj et Ohaba (rivière Amara Pietrosă)

Initialement, nous avons considéré deux approches pour l’obtention des débits moyens journaliers aux stations Călnic et Iasi – Gorj pour la période après 1998. La première a été d’étendre les séries des données en fonction de celui de la station en amont sur la même rivière. Toutefois, cette méthode se pratique pour les débits moyens annuels en général, tandis que pour les débits journaliers pendant les crues on risquait de ne pas capturer la vraie magnitude des débits. La deuxième méthode a été celui de la modélisation des débits, en mettant à cette occasion aussi en cause le climat. Au cours des crues, la pluie joue un rôle déterminant dans l’augmentation des débits et la propagation d’une station à l’autre. Nous avons opté pour le modèle pluie – débit GR4J, crée par Cemagref IRSTEA.

Pour la modélisation des débits journaliers dans la période d’après 1998 aux stations hydrométriques Călnic et Iasi – Gorj, nous avons fait appel au package R airGr, qui mets ensemble différents modèles développés par IRSTEA-HYCAR (France)<sup>32</sup>, pour utiliser les fonctions du modèle GR4J [Coron, 2017].

Le modèle GR4J a été créé au début des années ’80, ”en vue des applications pour la gestion de la ressource en eau et d’ingénierie (dimensionnement d’ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d’impact...)” [Perrin, 2007].

Au fil du temps, le modèle hydrologique GR4J a été utilisé dans plusieurs versions, proposées et améliorées par Michel (1989), Edijatno (1989, 1991 et 1999), Nascimento (1995), Perrin (2000, 2002 et 2003), Perrin (2002) et Perrin et al. (2003) et Oudin (2004). Aujourd’hui, il est très souvent utilisé dans les thèses de doctorat ou de master (Brigode, 2010; Delmas, 2012; Gherissi, 2012; Roux, 2014;) particulièrement dans la forme la plus récente, qui date de 2003.

Premièrement, il faut préciser que le modèle GR4J opère une triple considération de moyenne du système représenté par un bassin versant (Perrin et al., 2007). Il représente la dernière version du projet de

<sup>32</sup> Les modèles possibles à utiliser dans le package airGr sont les suivants : GR4H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M, GR1A and CemaNeige (IRSTEA, France)

Modèles de Génie Rurale (CEMAGREF), avec l'avantage de pouvoir arriver à une modélisation au pas de temps journalier.

GR4J prend en considération 4 paramètres optimaux :

X1 - capacité maximale du réservoir de production (mm);

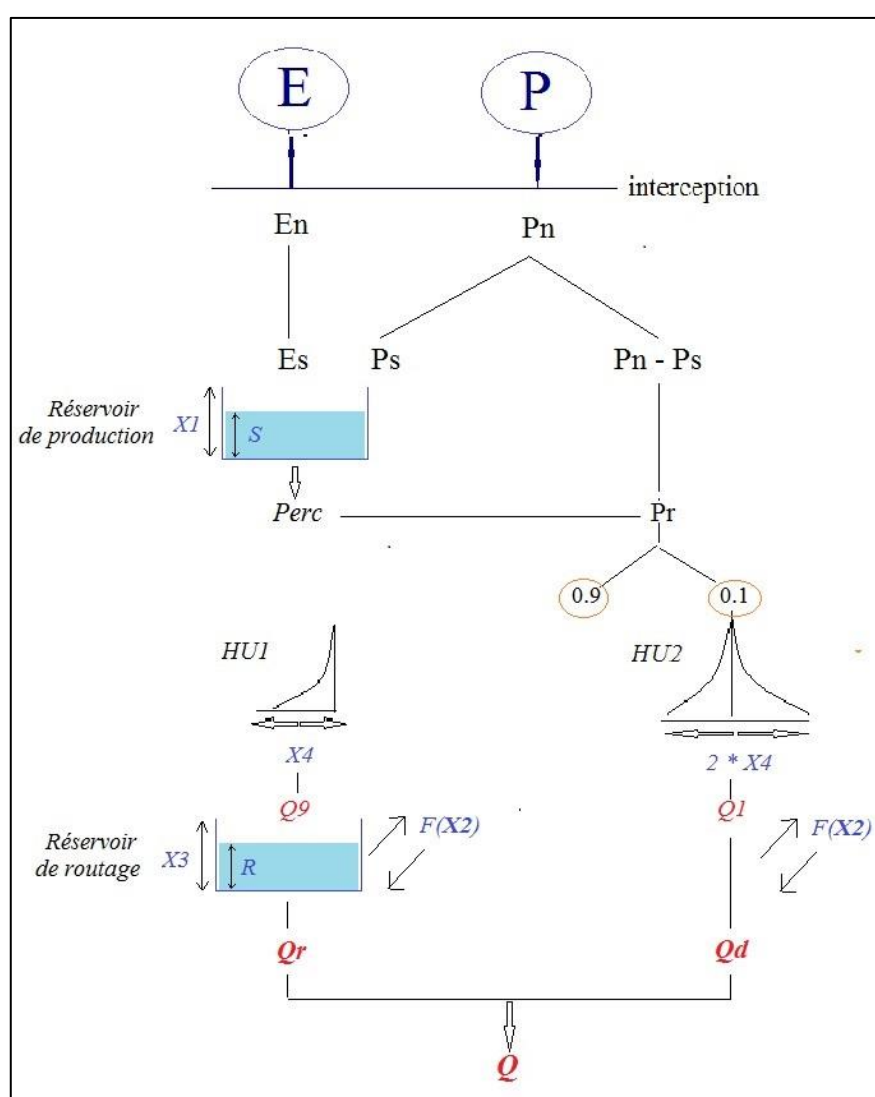
X2 - coefficient d'échanges souterrains du bassin versant (mm);

X3 - capacité maximale à un jour du réservoir de routage (mm);

X4 - temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j).

Le modèle utilise comme données d'entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration potentielle E (mm) [Perrin, 2007; Roux, 2014].

Sur la **Figure VII.27**, on peut voir le schéma de fonctionnement du modèle, auquel nous avons ajouté le principe de base pour le calcul du flux solide, à partir des paramètres climatiques modélisés (Q liquide) ou initiales (P et E).



**Figure VI.27.** Représentation schématique du Modèle GR4J avec de nouveaux ajouts sur le couplage des deux modèles<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Pour plus d'information sur le modèle GR4J, ainsi que sur d'autres modèles au pas de temps mensuel ou annuel, veuillez consultez [le site web d'Irstea](http://www.irstea.fr)



On peut constater que GR4J est un modèle conceptuel qui tient compte des conditions antérieures (réservoir de production, c'est-à-dire le sol qui reçoit une partie de la quantité de précipitations, mais qui peut aussi contribuer à l'écoulement quand il est saturé) et assure un fonctionnement en continu (par le réservoir de routage). Au niveau des processus considérés, GR4J est un modèle empirique, dont les données d'entrée sont seulement la pluie et l'évapotranspiration, mais au fur et à mesure qu'il fasse les calculs, il intègre dans sa structure l'ensemble d'équations permettant de simuler le comportement hydrographique du bassin versant.

Le comportement du modèle à l'échelle spatiale n'est pas dicté prioritairement par les processus physiques, mais par une moyenne spatiale de plusieurs processus. Ainsi, le GR4J est un modèle essentiellement global parce qu'il envisage le bassin versant comme un seul ensemble homogène, sans discrétiser les parties différentes (par exemple, les caractéristiques morphométriques) qui composent son tout.

La modélisation a été réalisée à l'aide de l'outil R Studio, en adaptant les lignes de codes du projet AirGR 1.0.15.2. Les pas de la modélisation ont été les suivants:

- La préparation des données, avec la fonction `PrepGR()`;
- La calibration du modèle, avec la fonction `CalGR()`;
- La simulation du modèle, avec la fonction `SimGR()`

On a utilisé GR4J\*: four-parameter daily lumped hydrological model [Perrin *et al.*, 2003], un des 6 modèles pluie – écoulement (avec stockage de l'eau inclus) du packet « airGR » développé en R

L'algorithme de calibration qui optimise le critère d'erreur sélectionné comme fonction objectif, par la procédure « Irstea-HBAN » a utilisé la fonction « Michel ». Le critère d'erreur choisi a été RMSE<sup>34</sup>. Les paramètres nécessaires ont été les suivants :

- Les séries de débits moyens journaliers des stations hydrométriques analysées, s.h. Câlnic sur la rivière Tismana et s.h. Iasi – Gorj sur la rivière Amaradia Pietroasă, pour la période de fonctionnement des stations (1968 – 1998 pour la première) et (1988 – 1998) pour la deuxième.
- Les séries de débits moyens journaliers des stations hydrométriques en amont, utilisées pour les corrélations (s.h. Godinești sur la Tismana et s.h. Ohaba sur l'Amaradia Pietroasă). Pour ces deux dernières stations, les séries entières jusqu'à 2014 ont été utilisées, pour modéliser les débits des stations en aval qui ont arrêté de fonctionner après 1998.
- Les quantités de pluie journalières sur toute la période d'analyse, pour les 4 stations hydrométriques. Ces données de pluie ont été extraites de la base de données ROCADA [Dumitrescu *et al.*, 2015], comme indice spatial moyen de chaque bassin versant en amont des stations, à partir du grid des précipitations agrégées au niveau national de la Roumanie.
- Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) au niveau journalier pour la période entière (1968 – 2014 pour le bassin de la Tismana) et (1988 – 2014 pour le bassin de l'Amaradia Pietroasă), à la base d'une formule de calcul élaborée par Oudin (2003). Les données d'entrée pour le calcul

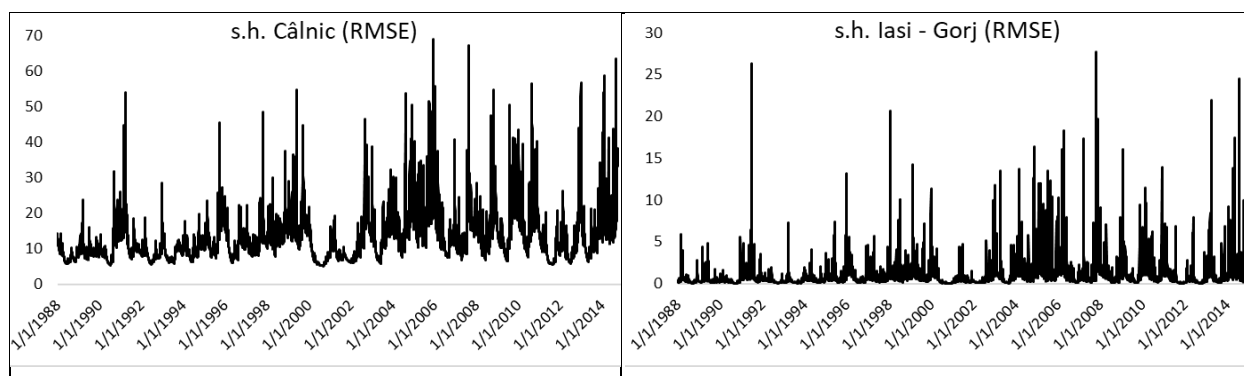
---

<sup>34</sup> Root Mean Square Error

de l'ETP ont été les températures moyennes journalières extraites toujours comme indice spatial des bassins versant amont des 4 stations de la base de données climatique de la Roumanie, ROCADA.

- Les informations spatiales des 4 stations hydrométriques : coordonnées géographiques pour le calcul de la radiation effective (pour la formule de l'ETP) et la superficie des bassins versants.

La période de mise en route la moitié des données a été d'une année et la période de calibration a été la moitié de la période commune des observations pour les deux paires de stations hydrométriques. Ensuite, la modélisation a été faite aussi pour la période commune, que pour la période 1998 – 2014, en essayant de minimiser les erreurs statistiques (RMSE final minimum). Les résultats obtenus ont été satisfaisants, l'évaluation étant faite à la base de la valeur du paramètre RMSE. Nous observons dans la **Figure VI.28** que les erreurs quadratiques carrées sont plus petites dans le modèle de la station Iasi – Gorj par rapport à celui de la station Câlnic. On considère que les résultats plus faibles en ce qui concerne le bassin de la rivière Tismana sont dus à la complexité de ce bassin, en termes d'aménagements hydroélectriques (barrages, réservoirs et dérivations) qui interviennent dans le régime de l'écoulement et rendent la prédiction des débits plus difficile.



**Figure VII.28.** Les erreurs quadratiques carrées de la modélisation GR4J des débits moyens journaliers aux stations hydrométriques de Câlnic (r. Tismana) et de Iasi – Gorj (r. Amaradia Pietroasă)

Les résultats complets de la modélisation (paramètres du modèle GR4J, débits mesurés vs. débits simulés pour la période commune d'observations et débits modélisés pour la période 1998 – 2014) sont fournis dans *l'Annexe 12*.

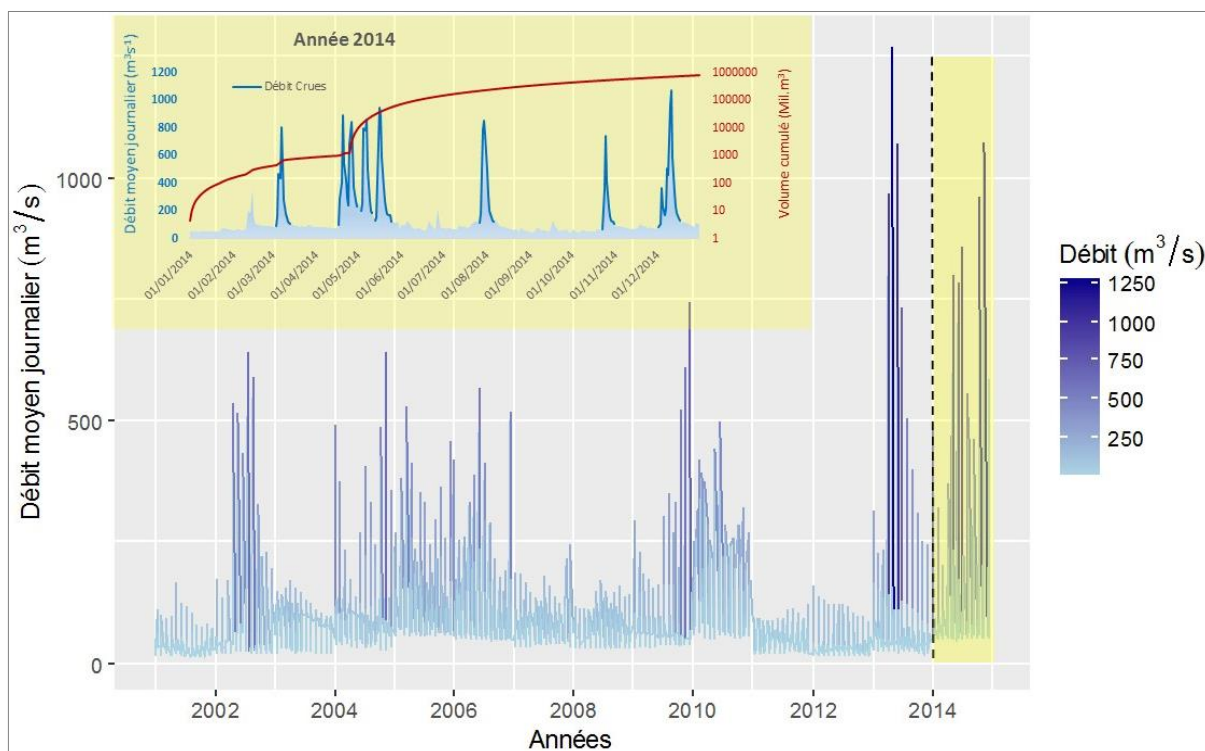
## 7.4. D'où viennent les crues ? Analyse des indices de crues

### 7.4.1. Principe d'analyse

Notre objectif dans ce chapitre est de trouver une méthodologie basée sur l'analyse des débits moyens journaliers durant les épisodes de crue sélectionnés, qui nous permette de caractériser les crues en déterminant les contributions respectives des différents bassins versants

Nous avons considéré un ensemble d'indices qui ont été calculés d'abord pour l'année 2014, caractérisée par un nombre important de crues (8), réparties sur toutes les quatre saisons, avec une fréquence plus élevée aux mois du printemps, en raison de l'effet cumulatif des facteurs météorologiques et hydrodynamiques caractéristiques du régime hydrologique de type sud-ouest carpatique [Savin, 2006]. Les crues de l'année 2014 sont différentes en termes de débits de pointe (entre  $743 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $1074 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), ainsi qu'en ce qui concerne la durée totale, le temps de montée des eaux et la répartition spatiale des apports des diverses contributions des sous-bassins tributaires. A tous ces éléments, il est à ajouter que 2014 est

certainement l'année la plus récente où la rivière aurait pu déposer des sédiments fins sur la berge accumulative de Podari, en raison de la période relativement courte entre l'année de réalisation de la tranchée (2017) et l'année probable du dépôt de la dernière couche. De plus, les crues des dernières années après 2014 n'ont pas eu des débits supérieurs aux maximums de 2014 (*Figure VII.29*) ayant à peine dépassé le seuil de  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . À la lumière de ces arguments, si nous associons la dernière couche déposée au sommet de la rive à une certaine crue débordante, celle-ci ne serait certainement pas plus récente qu'en 2014.



**Figure VII.29.** Histogramme des débits moyens journaliers ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) de la rivière Jiu à Podari (période 2002 – 2014)

Le principe d'analyse sera d'identifier des indices qui permettent de bien distinguer les différentes contributions des sous-bassins versants à la genèse des crues et des sédiments déposés dans le secteur inférieur de la Jiu. Que l'on se base sur la principale station de référence de Podari ( $V_{\text{station reference aval}}$ ), ou sur une autre station sur la Jiu située à un niveau supérieur, on peut considérer deux catégories de contributions: a) ceux provenant des bassins affluents en amont des stations hydrométriques situées le plus près de la confluence avec la rivière Jiu (noté ci-après  $V_{\text{B.V. amont}}$ ) et b) des apports intermédiaires ( $V_{\text{B.I.}}$ ) des (compléments des bassins) versants non jaugés entre la rivière Jiu et les stations hydrométriques des affluents considérés dans l'analyse. On doit tenir compte que pas tout ce qui passe en aval à la station de référence a été produit lors de la même crue et apporté de l'amont des bassins versants jaugés<sup>35</sup>. Pour cette raison, nous avons considéré nécessaire d'introduire la variable qui caractérise le volume perdu, non pas au sens de perte définitive, mais pour estimer la proportion du volume de l'entrée maximale des bassins

<sup>35</sup> Dans cette démarche, on fait abstraction du type de matière (liquide ou solide) qui passe en aval entre un secteur et un autre ou d'un bassin tributaire à la rivière Jiu. A priori, l'analyse des indices de crue s'appuyant sur les volumes liquides des crues est considérée applicable (dans la situation de l'existence des jeux de données des alluvions en suspension fiables) aux débits solides aussi, car à une vitesse élevée de l'eau d'une rivière durant la crue, les sédiments fins sont transportés à la même vitesse de l'eau

tributaires n'arrivant pas à la station de référence en aval. Le volume d'eau qui n'est pas directement repérée dans le volume de la crue de la station en aval reste stocké dans le bassin intermédiaire (ce que nous avons précédemment appelé  $V_{B.I.}$ ) et est ensuite repris lors d'une future crue. On distingue ainsi deux situations d'apport des bassins versant amont :

$$C_1 : V_{\text{station référence aval}} = V_{B.V. \text{ amont}} + V_{B.I.} \text{ et}$$

$$C_2 : V_{\text{station référence aval}} = V_{B.V. \text{ amont}} + V_{B.I.} + V_{\text{pertes B.I.}}$$

Où,  $V_{\text{station référence aval}}$  → la station hydrométrique sur la rivière Jiu à laquelle on fait référence à chaque niveau ;

$V_{B.V. \text{ amont}}$  → volume d'eau apporté par les bassins versants affluents considérés dans l'analyse, pour lesquels on dispose des séries de débits moyens journaliers ;

$V_{B.I.}$  → volume apporté par le bassin intermédiaire ;

$V_{\text{pertes B.I.}}$  → volume d'eau apporté par les bassins versant amont ou produit par le bassin versant intermédiaire lui-même, qui passe dans la nappe ou se dépose dans la plaine inondable avant d'arriver à la station de référence aval.

D'ailleurs, l'histoire du bassin intermédiaire soulève quelques questions méthodologiques : 1. *Est-il correct de rapporter le volume du bassin versant intermédiaire au volume de l'amont ?* En fait, on n'est pas intéressé d'estimer l'apport intermédiaire pendant une crue, mais plutôt de l'éliminer du calcul, pour pouvoir se rapporter strictement au volume de l'amont. 2. *Alors, à quoi vaut-il mieux rapporter le volume de chaque station amont ? Au volume total de l'amont, ou au volume de la station de référence de l'aval ?* Si le volume de la station de référence aval dépasse le volume amont, il vaut mieux utiliser un indice de rapport entre chaque contribution de l'aval et le volume de la station de référence aval. Mais au contraire, si le volume de la station de référence aval est inférieur au volume total des stations amont, il faut ajouter les pertes dans le bassin versant intermédiaire pour bien estimer l'apport de chaque bassin versant amont.

Toutes ces questions seront reprises dans les indices que nous avons conçus et seront clarifiées au fur et à mesure que nous les analyserons pour identifier ceux apportant des informations plus précises au modèle d'apport des bassins versants affluents correspondant à chaque configuration de crue.

## 7.4.2. Choix des indices de crue

Dans ce chapitre, nous avons défini 13 indices permettant de distinguer les contributions des sous-bassins du bassin de la rivière Jiu aux crues choisies au chapitre §7.2. En règle générale, tous les indices sont calculés à partir des débits moyens journaliers durant les périodes de crues et certains d'entre eux sont pondérés en fonction de la surface du bassin. Nous présentons en bas les paramètres qui ont été utilisés sous différentes formes pour calculer les indices de contribution des bassins hydrographiques lors des crues.

1) *Volume total de la crue.* Il correspond à la quantité totale d'eau écoulée durant la crue entre le premier et le dernier jour ; par le volume relatif on a exprimé le rapport entre le volume apporté par chaque sous-bassin versant et le volume à la station de référence en aval. En termes de pourcentage des apports des crues, on retrouve selon les différents indices les contributions de chaque bassin versant.

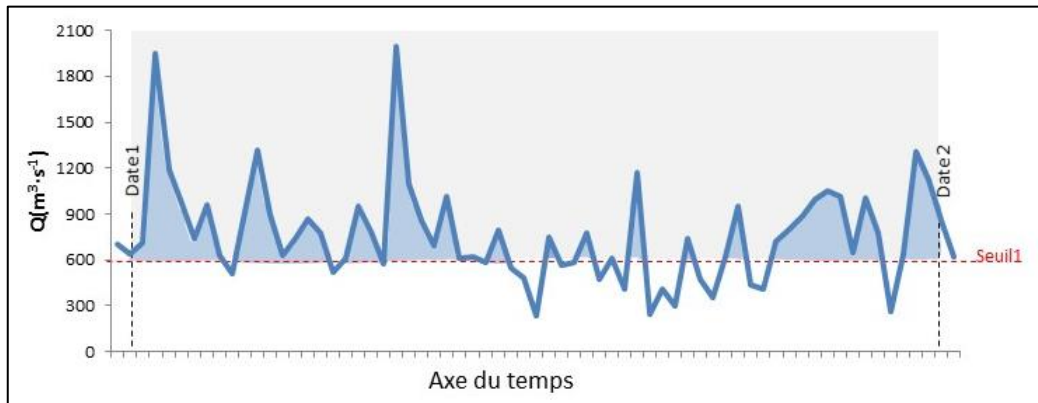
2) *Volume de la crue au-dessus de  $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .* Il s'agit que d'une partie du volume total d'une crue, écoulée le ou les jours où le débit de la station hydrométrique de Podari a été supérieur au  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Dans le cas où le débit a dépassé ce seuil, la croissance est générée par le volume d'eau provenant de l'amont,

mais le volume supplémentaire d'eau n'arrive pas de manière simultanée/concomitante de tous les sous-bassins contrôlés par les stations hydrométriques. Cette situation est déterminée par le fait que parfois, la crue nécessite plus de 4 heures pour se déplacer entre les stations hydrométriques situées en amont et les celles de l'aval. Par conséquent, dans le cas des stations plus éloignées de Podari, il faut aussi prendre en calcul le volume d'eau enregistré du jour précédent par rapport à la date où à Podari les débits ont dépassé  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (voir explications au §5.2.3.3 sur la célérité des ondes de crue).

Le volume correspondant à la crue ou à une partie de la crue a été obtenu en intégrant les débits ayant dépassé le seuil de  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  dans le temps entre deux dates :

$$\int_{date1}^{date2} (Q > seuil1 - Q_{seuil1}) dt$$

Pour exemplifier, dans la **Figure VII.30**, nous avons représenté, pour une période quelconque (1950 et 2016 à la station hydrométrique de Podari), les volumes correspondant aux débits dépassant le seuil établi.

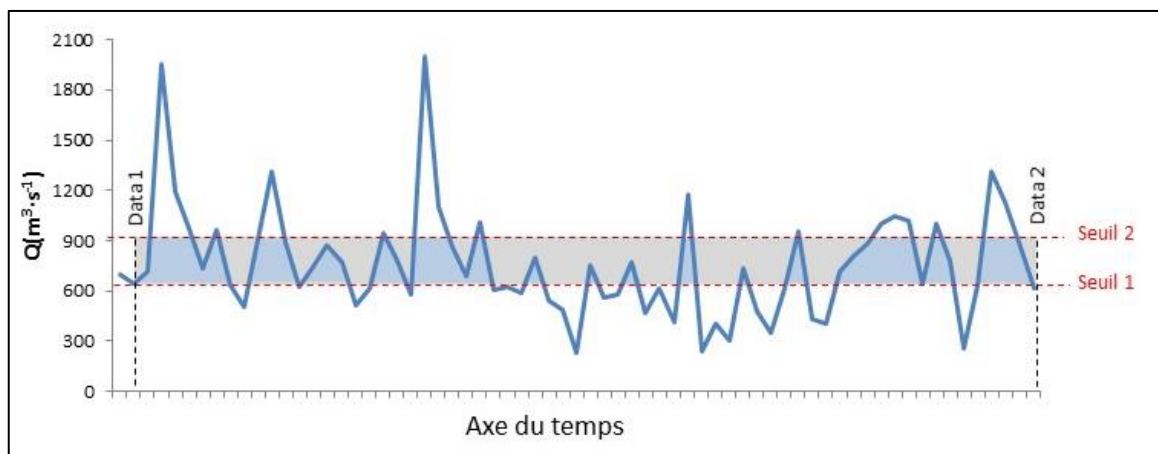


**Figure VII.30.** Représentation graphique du volume entre deux données, au-dessus d'un certain seuil

Ensuite, les volumes d'eau pour différentes tranches de débit ont été calculés pour classer les crues retenues :

$$\int_{date1}^{date2} (Q > seuil1 - Q_{seuil1}) dt - \int_{date1}^{date2} (Q > seuil2 - Q_{seuil2}) dt$$

Un exemple indicatif est donné sur la **Figure VII.31** pour la même période 1950 - 2016, tandis que les résultats pour la période d'étude 2002-2014 sont reportés dans le **Tableau VII.7**. Les deux variables à calculer permettent d'intégrer l'amplitude et la durée des flux liquides supérieurs à un certain seuil.



**Figure VII.31.** Représentation graphique du volume entre deux dates, entre deux seuils de débit



3) *Volume divisé par la superficie (ou la lame d'eau ruisselé)*. Ceci exprime la contribution théorique de chaque bassin versant en rapportant la superficie en amont de chaque station hydrométrique à la superficie du bassin versant de la Jiu correspondant à la station aval de référence de Podari, de Filiași ou de Sadu, selon le niveau d'analyse où on se trouve.

4) *Le cumul de précipitation lors d'une crue et le coefficient de ruissellement*. Le premier paramètre est une indication des réserves d'eau potentielles pouvant bénéficier les bassins contributeurs, constituant le paramètre le plus approprié pour représenter en miroir l'alimentation et le ruissellement. Le coefficient de ruissellement, est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée (dite "pluie nette") et la hauteur d'eau précipitée (dite "pluie brute"). Il est fortement influencé par l'utilisation/occupation des terres, surtout par le changement de classe d'utilisation marquant l'imperméabilisation des surfaces, et de la pente. Le **Tableau VII.11** résume les indices de crue considérés dans l'analyse

**Tableau VII.11.** Résumé des indices de crue considérés dans l'analyse

Catégorie	Nom de l'indice	Informations supplémentaires
La durée de référence est la totalité de la crue	1. Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence	
	2. Contribution en volume relatif au volume total amont	
	3. Lamme d'eau totale ruisselée	
	4. Contribution en volume relatif au volume total amont pondérée par la superficie du bassin versant	
	5. Volume de la crue/ volume annuel de la même station	
	6. Volume de la crue/ volume annuel de la même station dans la période 2001 - 2014	
	7. Volume de la crue/ volume total des crues étudiées entre 2001 et 2014	Si c'est le cas d'avoir plusieurs crues
	8. Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)	
La durée de référence est limitée à la pointe de crue	9. Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence	Idem Indice 1, avec une autre durée, centrée sur la pointe de crue
	10. Contribution en volume relatif au volume total amont	Idem Indice 2, avec une autre durée, centrée sur la pointe de crue
	11. Lamme d'eau totale ruisselée	Idem Indice 3, avec une autre durée, centrée sur la pointe de crue
	12. Volume de la crue/ volume annuel de la même station	Idem Indice 5, avec une autre durée, centrée sur la pointe de crue
	13. Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)	Idem Indice 8, avec une autre durée, centrée sur la pointe de crue

Ci-dessous, les indices sont présentés, en prenant le cas des crues de 2014. Une grille d'interprétation sur les possibles contributions des sous-bassins est donnée à chaque indice, pour ensuite faire la critique de chacun, en présentant les avantages et inconvénients.

## 7.4.3. Présentation des indices de crue pour l'année 2014

### 7.4.3.1. Indices considérant la durée totale de la crue

#### 7.4.3.1.1. Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence

Ce premier indice offre des informations sur la contribution de différents sous-bassins au volume total des crues à la station hydrométrique de Podari (*Figure VII.32*).

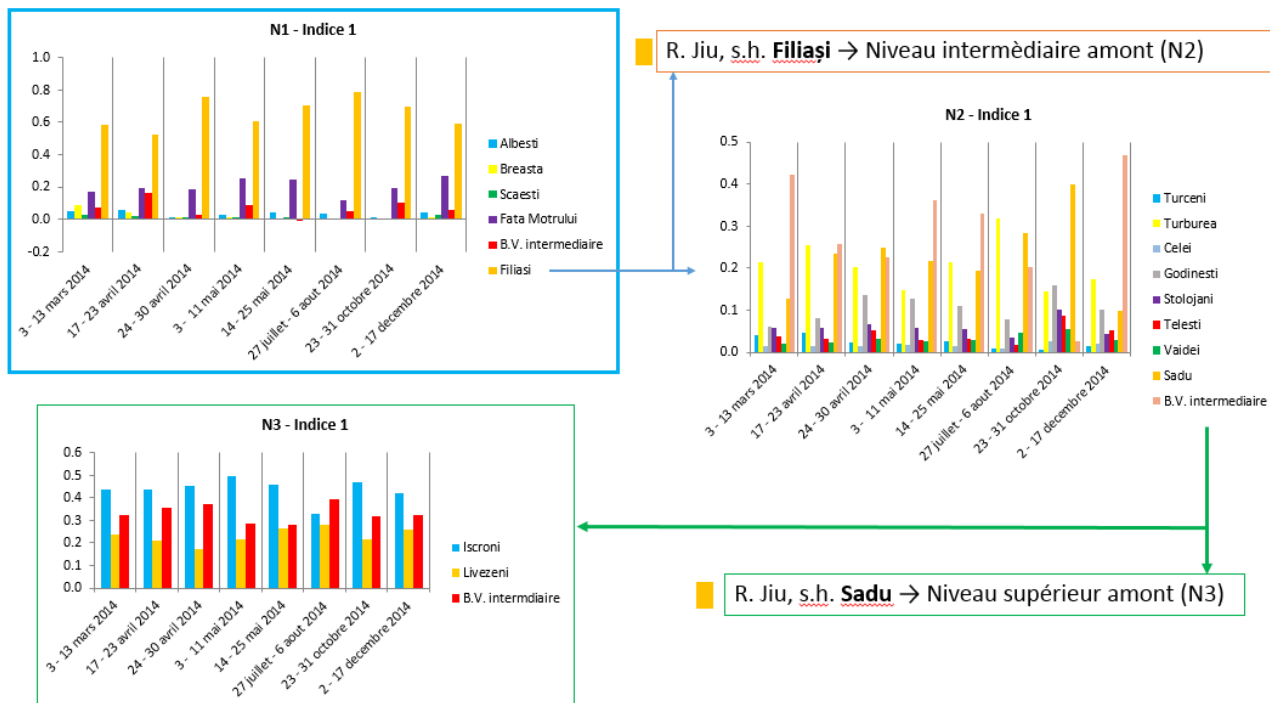


Figure VII.32. L'indice 1 pour les trois niveaux d'analyse

Il a été calculé selon la formule suivante :

$$I_1 = \frac{V_{total\_crue\_station\_x}}{V_{total\_crue\_station\_référence}}$$

L'avantage de cet indice réside du fait que nous rapportons les sources amont aux effets aval via le lien mathématique entre le volume de crue à chaque station en amont et le volume de crue à la station de référence aval. La normalisation du volume de chaque affluent par rapport à la station de référence est principalement effectuée dans le but ramener les valeurs à une échelle plus petite que la différence jusqu'au des dizaines de  $m^3s^{-1}$  entre les débits moyens d'une grande rivière et d'une petite rivière.

L'inconvénient de cet indice reste, cependant, qu'il est directement proportionnel au volume de la crue de chaque affluent. La valeur de l'indice est donc d'autant plus élevée que l'affluent est plus important. L'utilisation d'un tel indice risque donc de surestimer la contribution d'un grand affluent, tel que la rivière Motru, et de sous-estimer celle d'un affluent plus petit pouvant jouer un rôle important lors de certaines crues. En outre, un indice basé sur le volume de la rivière tend à donner plus d'importance à un affluent qui aurait contribué, de toute façon, pendant les périodes des moyennes eaux avec un volume important mais qui, lors d'une certaine crue, n'aurait peut-être pas eu un comportement hydrologique hors du commun.

Comme on le remarquera souvent pour d'autres indices, en général, la plus grande partie du volume se partage entre les apports du sous-bassin de la Motru et celui en amont de la station de Filiași sur la rivière Jiu. Même si le plus important volume est toujours apporté dans le niveau 1 – par la rivière Jiu, afin de faire

la différence entre les sous-bassins tributaires, nous essayons de voir lors de quelle crue chaque rivière présente une contribution plus importante:

*Crue 1* : La crue de Podari vient plutôt du bassin moyen (la Jiu entre Filiași et Sadu, rivière Motru, bassin de la rivière Tismana, ainsi que le bassin intermédiaire du niveau 1 – B.I.<sub>1</sub>). Elle est ainsi en très petite proportion apportée par la rivière Jiu amont de s.h. Sadu (le secteur supérieur ou niveau 3 ne contribue pas beaucoup).

*Crue 2* : C'est toujours plutôt le bassin moyen qui contribue, surtout les rivière Motru, Gilort et les B.I. (1 et 2).

*Crue 3* : Le bassin moyen, côté droit de la Jiu (les rivières Motru et Tismana) sort en évidence, avec un apport assez grand de la part de la Jiu de montagne (Jiu de l'Ouest et B.I.<sub>3</sub>)

*Crue 4* : C'est la crue où la Motru a la plus grande contribution, tandis que dans le niveau 2 (secteur moyen) il y a la Gilort et le B.I. 2 qui dominent les apports. Pas négligeable est l'apport de Tismana également, tandis que la Jiu supérieure se remarque aussi avec un apport considérable de la Jiu de l'Ouest.

*Crue 5* : Une crue prédominante du secteur moyen (la rivière Motru, le B.I. 2 et la rivière Gilort). Il existe également une valeur négative de l'indice dans le B.I.<sub>1</sub>. Cela ne signifie pas que le volume auquel il a contribué n'existait pas, mais qu'il y a eu des pertes dans la plaine inondable et qu'une partie des apports des affluents ont été stockés pendant la crue par le bassin intermédiaire, sans avoir été propagés en aval.

*Crue 6* : C'est une crue des secteurs moyen et supérieur apparemment. Aucune station du secteur aval ne sorte en évidence. En amont c'est la rivière Gilort qui se dispute avec la Jiu de montagne (apport de la station Sadu), suivies par le B.I.<sub>2</sub> et le bassin de la rivière Tismana. En amont des gorges, c'est difficile d'estimer l'apport, car c'est le mélange des eux branches de la Jiu (B.I.<sub>3</sub>) qui apporte le plus, suivis à distance par Jiu de l'Ouest seule.

*Crue 7* : Cette fois, il y a une crue provenant aussi du secteur moyen que supérieur et ce sont la rivière Gilort et les affluents de Tismana qui en prennent le coup, avec la Jiu amont de la s.h. Sadu. En amont des gorges, c'est toujours la Jiu de l'Ouest qui domine.

*Crue 8* : Cette crue paraît être essentiellement de l'aval et du secteur moyen. La rivière Motru apporte un volume considérable, suivi par le B.I. 2 et la rivière Gilort. Dans le secteur supérieur, l'indice de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est atteint le minimum de toutes les crues de cette année.

En conclusion, d'après l'indice 1, les possibles sources des crues semblent être dans la plupart des cas les grandes rivières telles que Motru, Gilort et Tismana et moins les petits affluents. Cela ne signifie pas que les autres affluents n'ont pas contribué, mais seulement que l'indice 1 n'est pas en mesure de faire la distinction à une échelle plus fine.

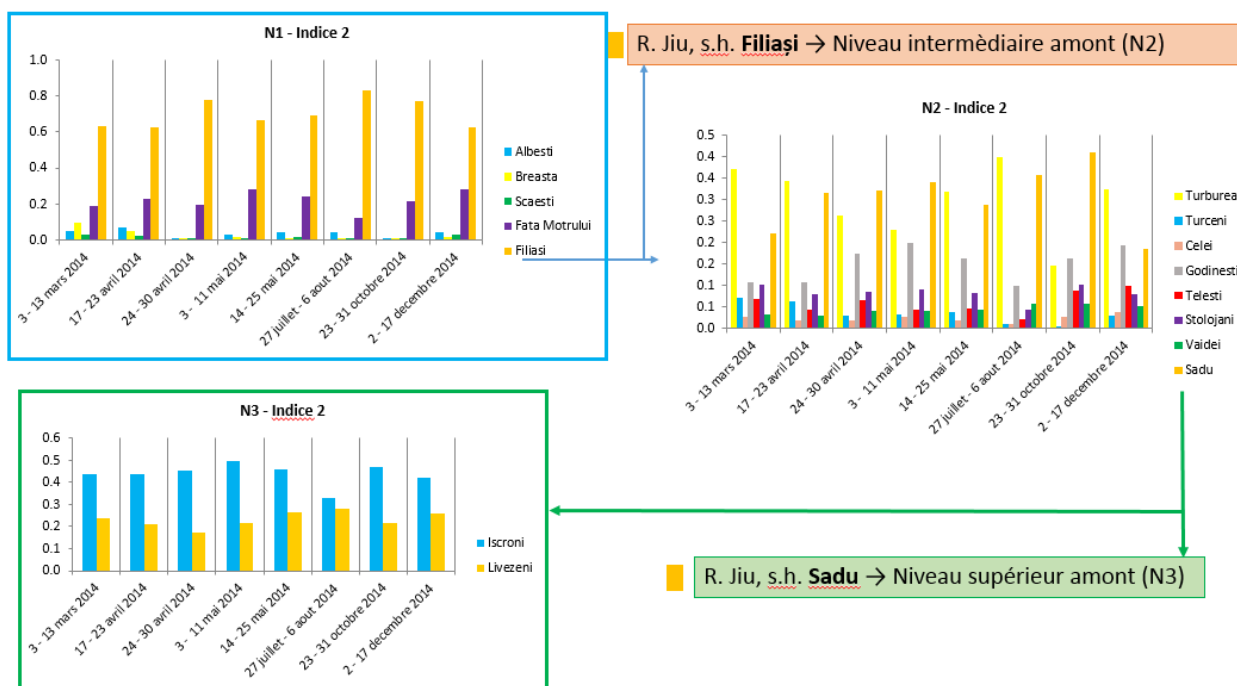
#### 7.4.3.1.2. Contribution en volume relatif au volume total amont

Une autre façon de quantifier les contributions des affluents pendant des crues consiste à calculer le rapport entre le volume de chaque bassin hydrographique et le volume de tous les affluents (exprimé par la somme des valeurs individuelles).

L'indice se calcule selon la formule suivante :

$$I_2 = \frac{V_{total\_crue\_station\_x}}{V_{total\_crue\_Stations\_amont}}$$

La **Figure VII.33** présente les résultats du calcul de l'indice 2 pour les trois niveaux d'analyse.



**Figure VII.33.** L'indice 2 pour les trois niveaux d'analyse

Un *avantage* de cet indice serait que, pour les bassins hydrographiques jaugés, ce rapport exprime effectivement la contribution de chacun des volumes d'eau provenant de l'amont, mais il présente quand même deux *inconvenients* majeurs: 1) les pertes dans le bassin intermédiaire sont inconnues, car nous ne savons pas quelle quantité totale du volume de l'amont atteint réellement la station de référence en aval et 2) cet indice néglige la quantité d'eau qui atteint réellement la station de référence en aval et utilise uniquement les informations en amont. Par conséquent, si on cherche à estimer la contribution du bassin intermédiaire, il est quelque peu incorrect de rapporter ce volume estimé (et non mesuré) au volume total d'eau généré en amont de ce bassin intermédiaire.

Comme il n'y a qu'une petite différence entre le volume total des contributions de la part des bassins en amont et du volume total dans la station de référence en aval, on peut constater que les valeurs de cet indice sont proches de celles du premier indice. Il est donc superflu d'insister sur la manière d'interpréter les résultats, car on vient de le fait dans le §7.3.6.1. Cependant, nous rappelons brièvement les principales caractéristiques des 8 inondations en termes de contributions possibles.

*Crue 1:* En aval ( $N_1$ ) et en amont ( $N_3$ ), l'indice 2 montre presque les mêmes contributions que l'indice 1. À la différence, pour  $N_2$ , nous notons une contribution plus forte du bassin de la rivière Tismana (son affluent Jaleș/ Runcu – SR- est au maximum lors de cette crue).

*Crue 2:* La crue semble provenir de tous les niveaux, surtout de l'aval et du secteur moyen.

*Crue 3:* Le volume provient notamment de la Jiu et du B.I.<sub>2</sub>, avec des petites contributions aussi des rivières Motru, Tismana et Gilort.

*Crue 4:* Comme on l'a constaté à l'indice 1, le volume de la crue est amené en grande partie par la rivières Motru, Tismana et Jiu de l'Ouest (toutes les 3 sont dans la partie occidentale du bassin de la Jiu). On va vérifier à l'indice 8 si les pluies ont été aussi plus fortes là-bas.

*Crue 5:* Une crue formée plutôt dans le secteur moyen (dans les bassins des rivières Gilort et Tismana), mais aussi sur la rivière Jiu de l'Est.

*Crue 6:* Une crue du secteur moyen (Jiu à Filiași atteint la valeur maximale de cet indice, ainsi que la rivière Gilort). Il est possible qu'une partie de la crue vienne de la Jiu de montagne, mais on ne sait pas plus exactement de quelle partie (c'est le B.I.<sub>3</sub> qui apporte le plus et on ne peut pas distinguer clairement entre les deux branches de la rivière Jiu).

*Crue 7:* Une crue de l'amont (Jiu de l'Ouest notamment) et de la rivière Motru. Le reste des stations dans le secteur moyen ne sortent pas en évidence.

*Crue 8:* Une crue fortement influencée par la rivière Motru, suivie des volumes considérables dans le B.I.<sub>2</sub> et sur la rivière Gilort. On confirme ce qu'on a aussi constaté à l'indice 1, que la crue ne vient pas de l'amont (secteur supérieur).

Nous concluons que, selon cet indice, les sous-bassins hydrographiques des grandes tributaires ont été favorisés, alors qu'il a été plus difficile à repérer les affluents plus petits, qui ont apporté quand même une contribution importante à la représentation graphique. Parmi les plus petits affluents, lors de la crue de mars 2014, la rivière Raznic à la station de Breasta (9%) a eu une contribution est supérieure aux prévisions, car le rapport de surface entre ce bassin et celui de la station de référence aval (Podari), est seulement de 5,13%. Il reste à voir si l'importance de ce bassin hydrographique est également montrée par d'autres indices.

#### 7.4.3.1.3. *Lame d'eau totale ruisselée*

On définit la lame d'eau comme une mesure d'écoulement en dépendance avec la superficie du bassin versant. Cet indice a été déterminé comme le rapport entre le volume qui s'écoule en moyenne par jour et la superficie du bassin versant :

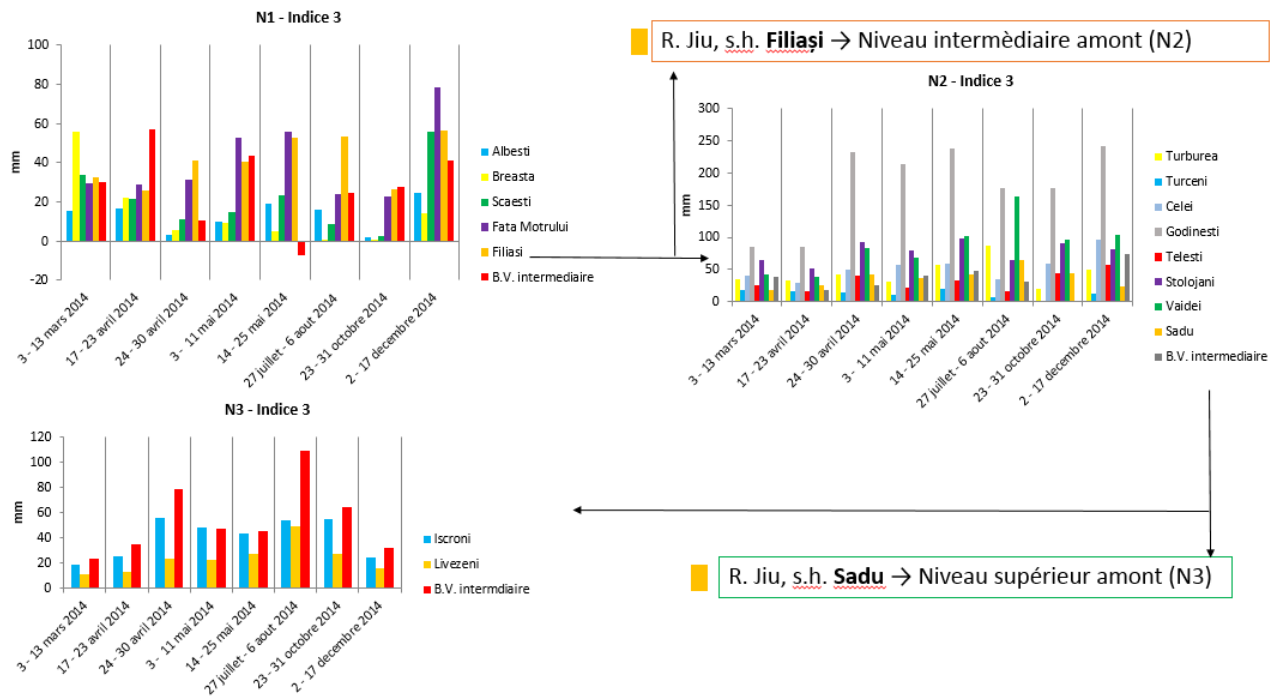
$$I_3 = \frac{V_{total\_crue\_station\_x}}{Superficie_{bassin\_versant\_à\_la\_station\_x}} 1000$$

L'utilisation de cet indice porte l'avantage de fournir des valeurs plus proches pour les bassins hydrographiques ayant différentes surfaces. L'indice est ainsi une mesure d'écoulement des précipitations atmosphériques au sein du bassin versant d'un cours d'eau. Quand même, l'inconvénient est dans certains cas, la surestimation des contributions des petits bassins versants affluents ayant une lame d'eau élevée, grâce à leur petite taille, lorsqu'en réalité ils n'ont pas beaucoup contribué au volume en aval.

Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les principales contributions à la formation des 8 crues, selon les valeurs de l'indice 3 (*Figure VII.34*):

*Crue 1:* Il est très difficile de distinguer une contribution plus significative d'un affluent, car cet indice égalise la contribution des petites et des plus grandes rivières. Nous notons au niveau 1 une contribution plus importante de la rivière Raznic, suivie de près par les rivières Argetoiaia, Motru et Jiu. Nous remarquons donc que cette fois-ci l'ordre des contributions est inversé. Au niveau 2, par rapport au niveau 1, même si la crue 1 ne montre pas une lame d'eau trop élevée en 2014, on peut constater que le maximum atteint sur la rivière Tismana dépasse de près 30 mm celui de la rivière Raznic en aval. Dans la région montagneuse, cependant, aucun des branches de la rivière Jiu ne produit un volume remarquable qui pourrait se propager en aval.





**Figure VII.34.** L'indice 3 pour les trois niveaux d'analyse

*Crue 2:* Dans le secteur inférieur, la lame d'eau est presque 2 fois plus élevée dans le B.I.<sub>1</sub> que dans les rivières Motru, Jiu et Raznic, ce qui signifie qu'il s'agit d'une crue formée dans les secteurs inférieurs des rivières. Dans le secteur moyen, seule la rivière Tismana présente une lame d'eau plus grande, dû au fait, comme nous l'avons vu au chapitre 6, que le débit moyen pluriannuel à la station de Godinești est dans toutes les phases du régime hydrologique trois fois supérieur à ce qui aurait été normal pour un bassin de cette taille, en raison des aménagements hydroélectriques.

*Crue 3:* Au niveau 1, le volume provient principalement de la rivière Jiu en amont de Filiași, tandis qu'au niveau 2, le bassin de Tismana indique la valeur maximale de la lame d'eau, supérieure à 200 mm.

*Crue 4:* En aval (secteur inférieur), la rivière Motru semble contribuer le plus, suivie de B.I.<sub>1</sub> et du bassin de la rivière Jiu en amont de Filiași. En allant plus loin au niveau 2, nous remarquons que la rivière Tismana domine à nouveau la hiérarchie, la distribution des valeurs de lame d'eau des autres rivières étant aussi petite que lors de la précédente crue.

*Crue 5:* L'indice 3 montre une contribution importante des bassins Motru et Jiu en amont de Filiași, puis de Tismana. Dans le secteur supérieur (niveau 3), il ne semble pas y avoir de lame d'eau importante. Concernant la valeur négative de l'indice pour le B.I. 1, l'explication est la même que dans l'index 1, avec la différence que la valeur de la lame d'eau est plus prononcée.

*Crue 6:* L'indice confirme que la crue vient plutôt du secteur moyen (la rivière Jiu amont de Filiași, la rivière Șușița et la rivière Gilort ont des valeurs élevées de la lame d'eau). La crue provient aussi du secteur de montagne, car la lame d'eau sur le bassin intermédiaire 3 est importante.

*Crue 7:* En aval (secteur inférieur – niveau 1), les valeurs de la lame d'eau sont les plus faibles parmi les crues de 2014. Au niveau 2, on voit de nouveau la contribution de Tismana, de son affluent Runcu et de la rivière Șușița. Le niveau 3 présente des valeurs moyennes de cet indice. On ne peut pas conclure si l'influence du secteur supérieur s'arrête avant la station de Sadu ou si les deux branches de la rivière Jiu contribuent aussi.

*Crue 8*: Etant la plus grande crue de l'année, tous les affluents ont contribué d'une façon ou l'autre. Au niveau 1, on remarque une lame d'eau ruisselée qui atteint le maximum à Motru. Toutefois, les contributions du niveau 1 semblent être fortes aussi de la part des bassins versants de Argetoiaia et Amaradia. Dans le secteur 2, c'est toujours la rivière Tismana qui se remarque. On dirait que la crue est plutôt formée des apports du secteur inférieur, avec une moindre influence des deux autres niveaux de l'amont.

Nous remarquons cette fois-ci un autre type de distribution spatiale des contributions pour chaque crue. Une nouveauté apparaît dans le bassin hydrographique intermédiaire de l'aval (B.I.1), qui semble avoir stocké et redistribué plus tard en aval une quantité d'eau importante lors de la crue 6. En ce qui concerne le bassin de la Jiu en amont de la station hydrométrique de Filiași, la lame d'eau des petites rivières affluentes est comparable à celle du bassin de la rivière Motru.

Cet indice a introduit des éléments de nouveauté dans l'interprétation des contributions de chaque bassin versant tributaire. Quand même, nous devons traiter cet index avec prudence. Il favorise les petits bassins avec une lame d'eau assez haute par rapport à la superficie et on peut avoir la tendance d'apprécier que la crue vienne dans la plupart des temps des petits bassins versants. Par exemple, lors de la crue 1, le b.v. de Breasta (s.h. Raznic) semble être le plus fort, mais il est suivi de l'autre b.v. petit, de la rivière Argetoiaia. Dans le secteur moyen, toujours le b.v. de Tismana est favorisé, grâce à son débit 3 fois plus grand que la normale avant les aménagements des années '80. Par contre, pour la crue 8, cet indice est en ligne avec les deux autres. Il confirme que la crue est notamment de l'aval (Motru, Jiu à Filiași, et les plus petits affluents Argetoiaia, Amaradia et Orlea, ont le max de lame d'eau). La crue 6 paraît provenir de partout, puisque la lame d'eau est assez grande en amont (B.I.3), tout aussi comme pour le b.v. de Tismana et les b.v. en aval – les rivières Motru et Raznic.

#### 7.4.3.1.4. Contribution en volume relatif au volume total amont (%) pondérée par la superficie du bassin versant

Le quatrième indice se construit à partir du deuxième, étant obtenu un rapport entre celui-ci et le pourcentage de la superficie totale du bassin occupée par chaque sous-bassin contributif.

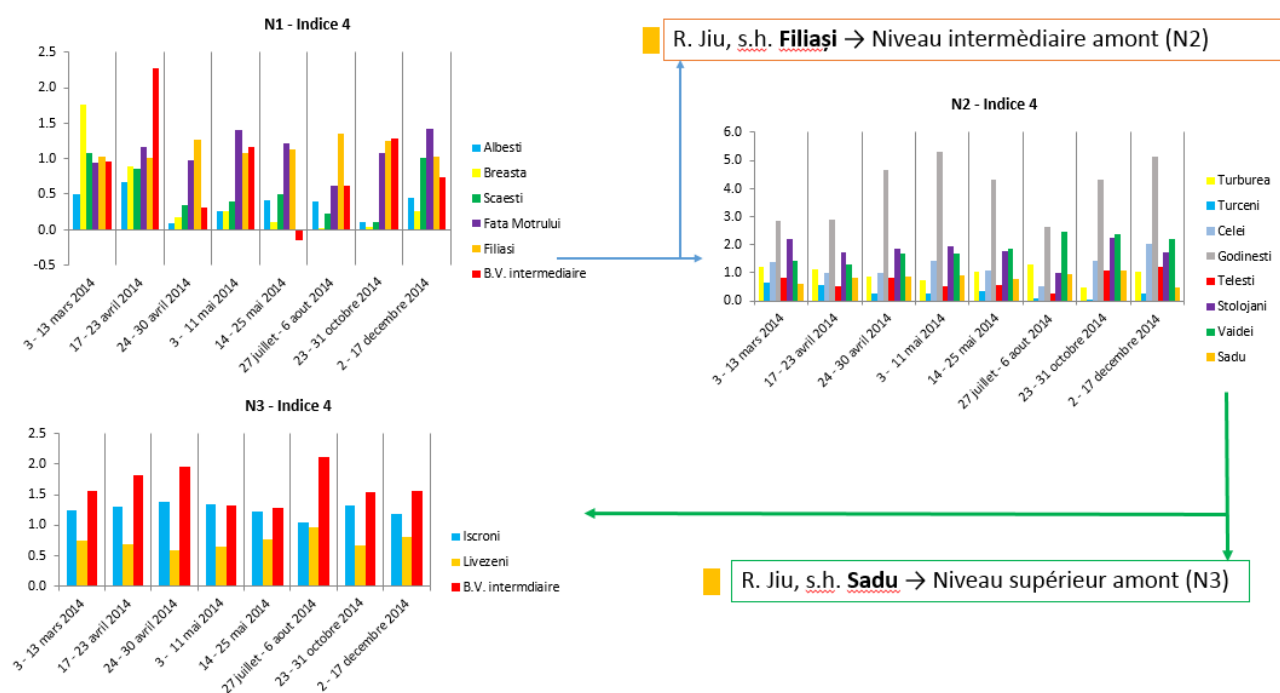
$$I_4 = I_2 \frac{S_{total\_bv\_amont}}{S_{bv\_station\_x}} = \frac{V_{total\_crue\_station\_x}}{V_{total\_crue\_stations\_amont}} \frac{S_{total\_bv\_amont}}{S_{bv\_station\_x}}$$

En utilisant deux paramètres hydrologiques et morphométriques pour le calculer<sup>36</sup>, cet indice se rapproche beaucoup en valeurs pour les différentes stations hydrométriques analysées, soulignant la contribution possible de certains bassins affluents moins visibles à l'échelle régionale (i.e. le bassin affluent de la petite rivière Amaradia ou le bassin intermédiaire).

Nous avons, d'une part, la confirmation que lors de la crue 6 de juillet-août, la rivière Amaradia à la station hydrométrique d'Albești a eu sa plus grande contribution, lorsque la contribution relative du sous-bassin de Motru est plus faible ; celle du bassin intermédiaire est aussi petite. Cela peut être une bonne indication de la relation entre le volume excédentaire de certains sous-bassins affluents et le volume stocké dans le bassin intermédiaire avant d'atteindre la station de référence en aval.

<sup>36</sup> Le volume de la crue et la superficie du bassin versant en amont d'une station hydrométrique

Si on considère le volume station/ volume amont pondéré par la superficie, il semble que les apports des différents sous-bassins s'égalisent et on ne sait pas trop qui a vraiment contribué. Les plus petits b.v. sont encore cette fois-ci de nouveau mis en évidence. Selon cet indice, aucune crue ne provient de l'amont (secteur supérieur – niveau 3), ce qui n'est pas vrai, car on voit clairement des plus grandes valeurs pendant la crue 6 aux stations Isroni et Livezeni sur la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est (**Figure VII.35**). Pourtant, la liaison entre le niveau 2 et le niveau 3 n'est pas évidente, car on ne retrouve pas une valeur élevée de cet indice à la station Sadu sur la Jiu amont. Il y a aussi les crues 1 et 2 qui se distinguent en tant que crues de l'aval et du secteur moyen (Rivière Raznic et B.I. 1 ont un apport considérable, ce qui confirme la formation de la vague de crue plutôt dans les parties aval des bassins versants affluents, entre leurs stations hydrométriques et la rivière Jiu).



**Figure VII.35.** L'indice 4 pour les trois niveaux d'analyse

#### 7.4.3.1.5. Volume de la crue/ volume annuel de la même station

Cet indice est une mesure de l'importance de chaque crue par rapport au volume total de l'année. Il hiérarchise les crues d'une année, s'il y en a plusieurs qui auraient pu être incriminées pour le transport et le dépôt de sédiments, tout en respectant le seuil établi à partir de la relation niveau – débit. La façon de calculer l'indice est la suivante :

$$I_5 = \frac{V_{total\_crue\_station\_x}}{V_{total\ même\ année\ de\ la\ même\ station}}$$

Cet indice se particularise par les contributions plus dispersées entre les différentes crues des petites rivières, comme on peut le voir dans la **Figure VII.36**.

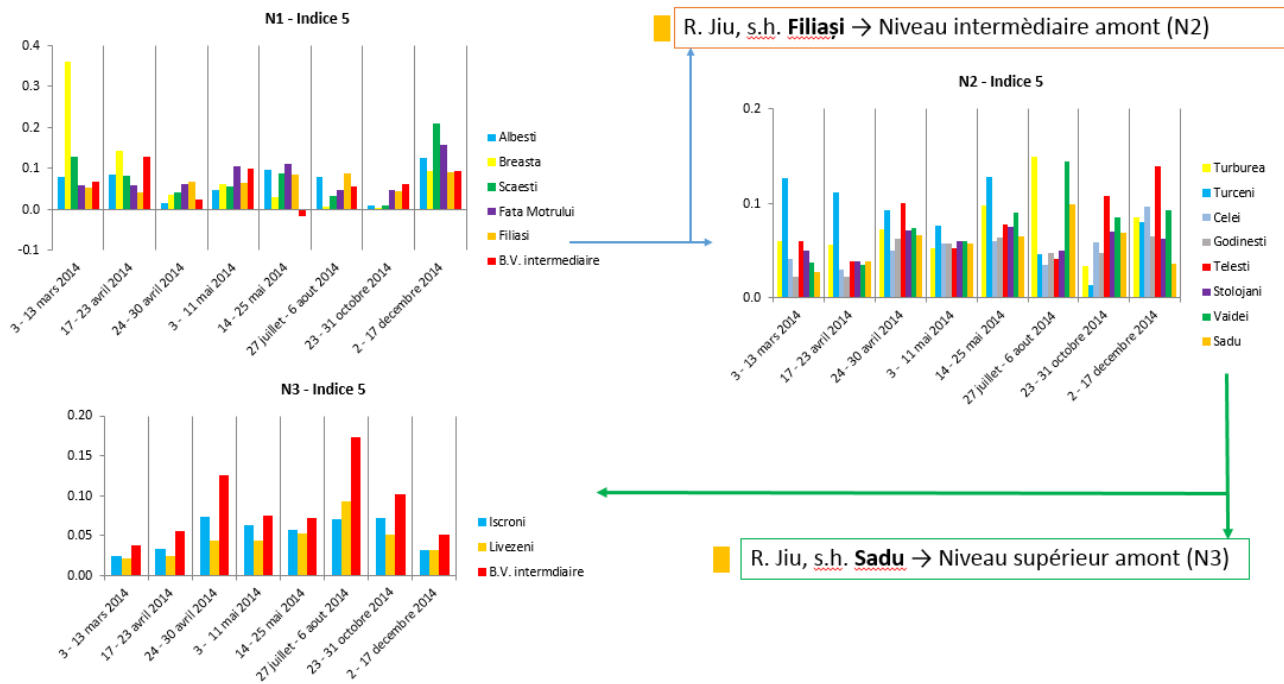


Figure VII.36. L'indice 5 pour les trois niveaux d'analyse

On peut constater qu'au niveau 1, les crues 1 et 2 détiennent une bonne partie du volume de l'année, surtout celles correspondant aux rivières Breasta et Argetoaia. Au niveau 2, les 5 premières crues de l'année semblent occuper un pourcentage important du volume total écoulé en 2014 sur la rivière Jilț. La rivière Gilort apparaît également avec plusieurs crues de même importance, qui occupent une grande partie du volume cumulé en 2014. Pour les bassins hydrographiques du secteur supérieur (Jiu de l'Est et Jiu de l'Ouest), seule la crue 6 semble avoir occupé un pourcentage plus important du volume annuel total.

Ainsi, cet indice met en évidence les plus petites stations en aval (Breasta sur la rivière Raznic pour les crues 1 et 2; Scaiești sur la rivière Argetoaia, pour les crues 1 et 8) et donne moins d'importance aux grands affluents. Au niveau 2 toujours, les petits affluents (la Șușița, la Jilț) apportent des volumes bien évidemment plus grandes lors des crues par rapport à l'année.

Si on considère l'effet de surestimation des apports de petits affluents, on risque de discréditer cet indice, alors que dans le cas des grands affluents, comme la Gilort et la Motru, lors des crues vraiment fortes (crues 6 et 8), il confirme les deux premiers indices. La conclusion pour cet indice serait qu'il surestime l'importance d'une crue des petites rivières, mais donne des bons résultats pour les crues fortes des grands affluents.

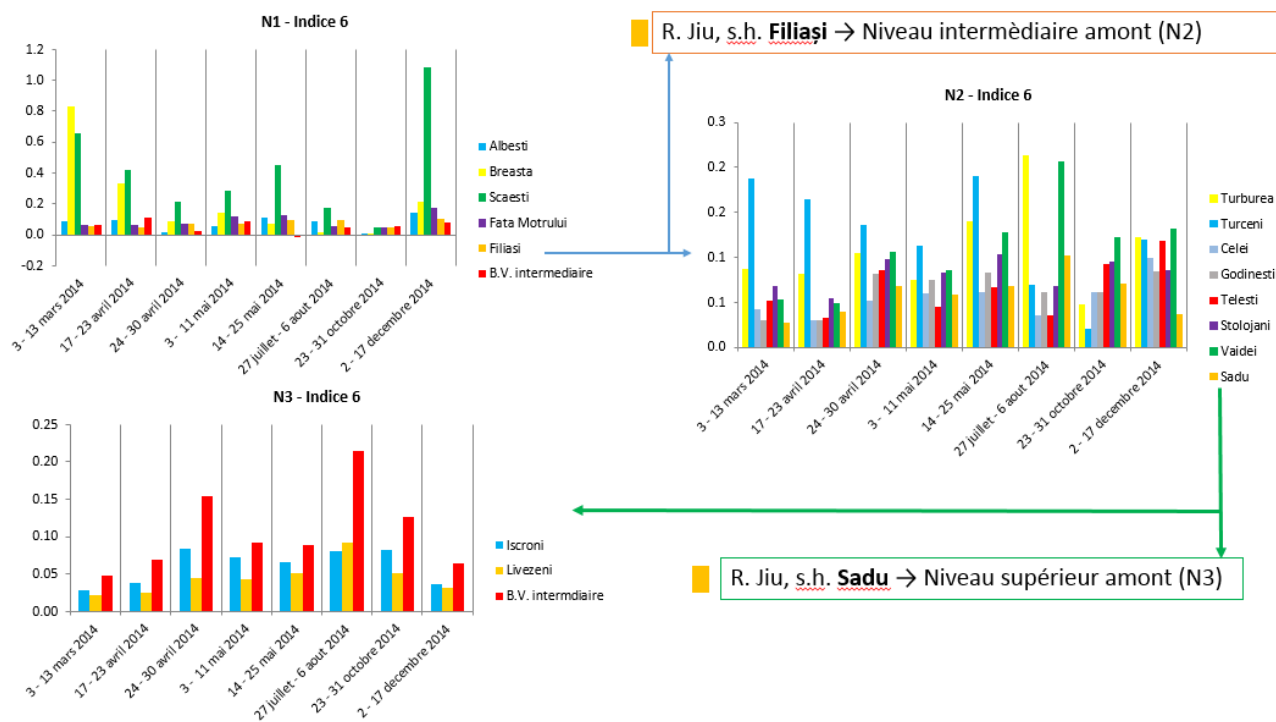
#### 7.4.3.1.6. Volume de la crue/ volume multiannuel de la même station (dans la période 2002 – 2014)

Le but de cet indice est de voir quelle est l'ampleur du volume de chaque crue par rapport au volume annuel moyen au cours de la période d'étude (2002 - 2014). Cette approche nous permet de comparer les crues d'une année à l'autre et de les hiérarchiser. Il se calcule selon la formule suivante :

$$I_6 = \frac{V_{total\_crue\_station\ x}}{V_{moyen\ multiannuel\ à\ la\ station\ x}}$$

Comme pour l'indice précédent, la première et la dernière crue se distinguent avec des rapports de volume plus importants des affluents petits.

L'avantage de cet indice est de mettre en évidence les petits bassins versants, dont le volume apparaît élevé par rapport à la moyenne de toutes les années d'analyse, ce qui marque l'importance de certaines crues pour certaines stations : station Breasta (rivière Raznic) pour la crue 1, ou la station Scaiești (rivière Argetoiaia), pour la crue 8. Par contre, un inconvénient serait, comme dans le cas de l'indice précédent, le risque de sous-estimer la contribution des principaux affluents (Motru, Gilort, Tismana, voire la Jiu), pour lesquelles les crues ne diffèrent pas tellement les unes des autres en ce qui concerne le volume d'eau transporté. Les résultats de l'indice 6 sont présentés dans la **Figure VII.37**.



**Figure VII.37.** L'indice 6 pour les trois niveaux d'analyse

En cherchant l'importance d'une crue par rapport au volume moyen multiannuel, cet indice donne encore plus d'attention aux petits affluents. En aval ( $N_1$ ), la crue 1 de Raznic sorte en évidence, à côté de presque toutes les crues de la rivière Argetoiaia (s.h. Scaiești), alors que l'apport de la rivière Motru est totalement sous-estimé. Au niveau  $N_2$ , ce sont les rivières Jilț et Șușița qui contribuent le plus lors des crues de 2014 par rapport à la moyenne multianuelle. La rivière Gilort apparaît à nouveau avec une valeur plus élevée de l'indice 6, qui confirme l'origine d'une grande partie de la crue dans ce bassin tributaire de la Jiu. En amont ( $N_3$ ), la différence entre les deux branches de la rivière Jiu se maintient en faveur de la Jiu de l'Ouest. Les crues 3 et 6 semblent être les plus contributives de la part des deux bassins de la Jiu (de l'Ouest et de l'Est) en amont, ce qui est conforme aux constats des indices antérieurs.

#### 7.4.3.1.7. Volume de la crue/ volume des crues de la même station dans la période analysée (2002 – 2014)

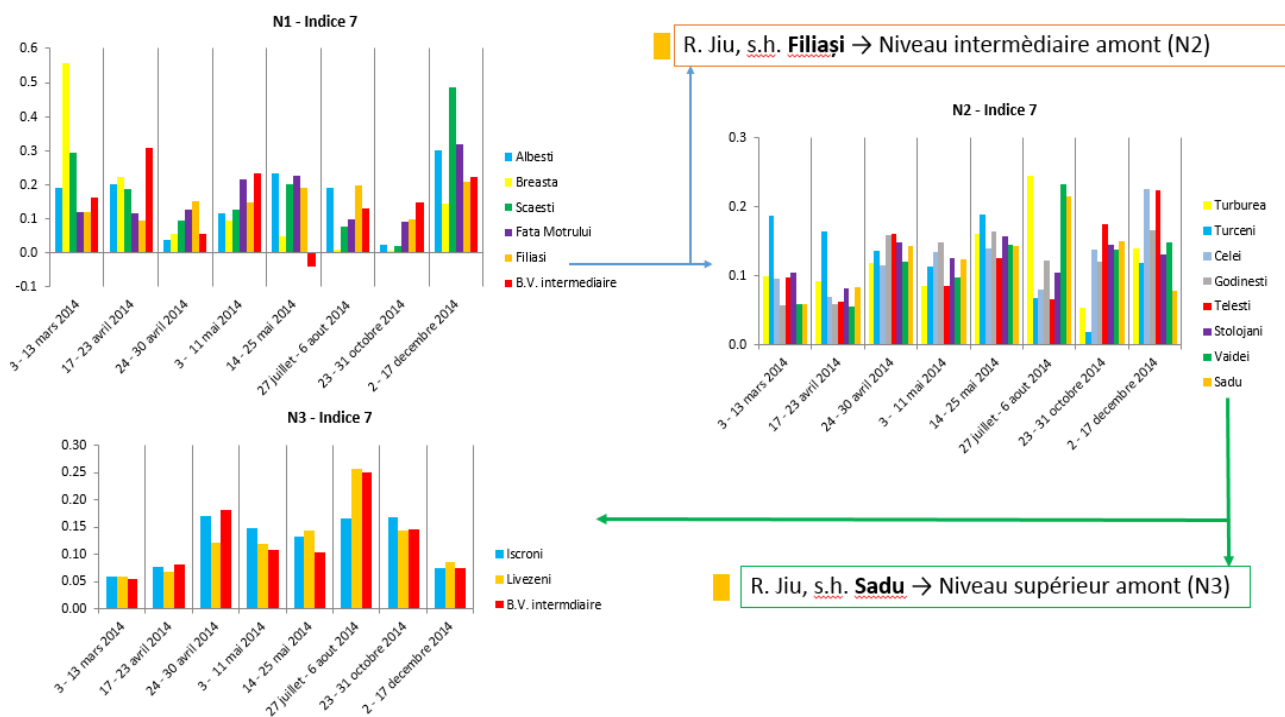
L'indice 7 met en évidence les crues dominantes responsables d'avoir transporté et probablement déposé la plus grande quantité de sédiments au cours de la période (2002 - 2014), compte tenu du rapport entre leur volume et le volume total des crues.



$$I_7 = \frac{V_{total\ crue\ station\ x}}{V_{total\ des\ crues\ dans\ la\ période\ d'\ analyse\ à\ la\ station\ x}},^{37}$$

Cet indice met l'accent sur l'importance de la crue parmi les autres crues de la période. Bien qu'elle soit plus robuste que l'indice 6 (§7.3.4.6), qui ne se rapporte qu'à un volume moyen pluriannuel, pour ce dernier, les valeurs correspondant à certaines crues restent très serrées d'une station à l'autre, ce qui rend la différenciation de la contribution de chacune d'elles assez difficile. Malgré l'inconvénient de ne pas bien différencier les contributions des affluents, les résultats de cet indice s'avéreront utiles pour comparer les crues par rapport aux événements de dépôt des couches de la tranchée. Pour une interprétation plus détaillée, l'index 7 sera repris dans le chapitre §8.3.6. sur la synthèse des crues.

Pour un bref aperçu des résultats de cet index, dans le secteur inférieur (N<sub>1</sub>), on confirme l'importance de la crue 1 (de mars) pour la station de Breasta, de la crue 8 (de décembre) pour les stations de Scaiești, Albești, Fața Motrului et Filași (*Figure VII.38*).



**Figure VII.38.** L'indice 7 pour les trois niveaux d'analyse

Les bassins intermédiaires des niveaux 1 et 2 contribuent également pour un volume plus important aux crues 1, 4 et 8, alors que dans le cas de la crue 5, il a plutôt stocké le surplus des affluents situés en amont. Dans le secteur moyen (N<sub>2</sub>), les crues 1 et 5 ont la même importance pour la rivière Jilț, la crue 6 est confirmée comme étant la plus grande pour la Gilort et pour la Șușița, tandis que la Tismana dispute ses crues 3, 5 et 8. La rivière Jiu en amont (secteur supérieur) contribue plus à la crue 6 en tandem avec la rivière Gilort, tel comme les indices 1 et 2 ont montré également. Pour le secteur montagneux, c'est l'inversion entre les deux branches de la Jiu en tant qu'importance de la crue. On commente surtout la crue 6, disputé en aval entre Gilort et Jiu, qui semble provenir plutôt de la Jiu de l'Est. Le rôle des B.I. n'est pas

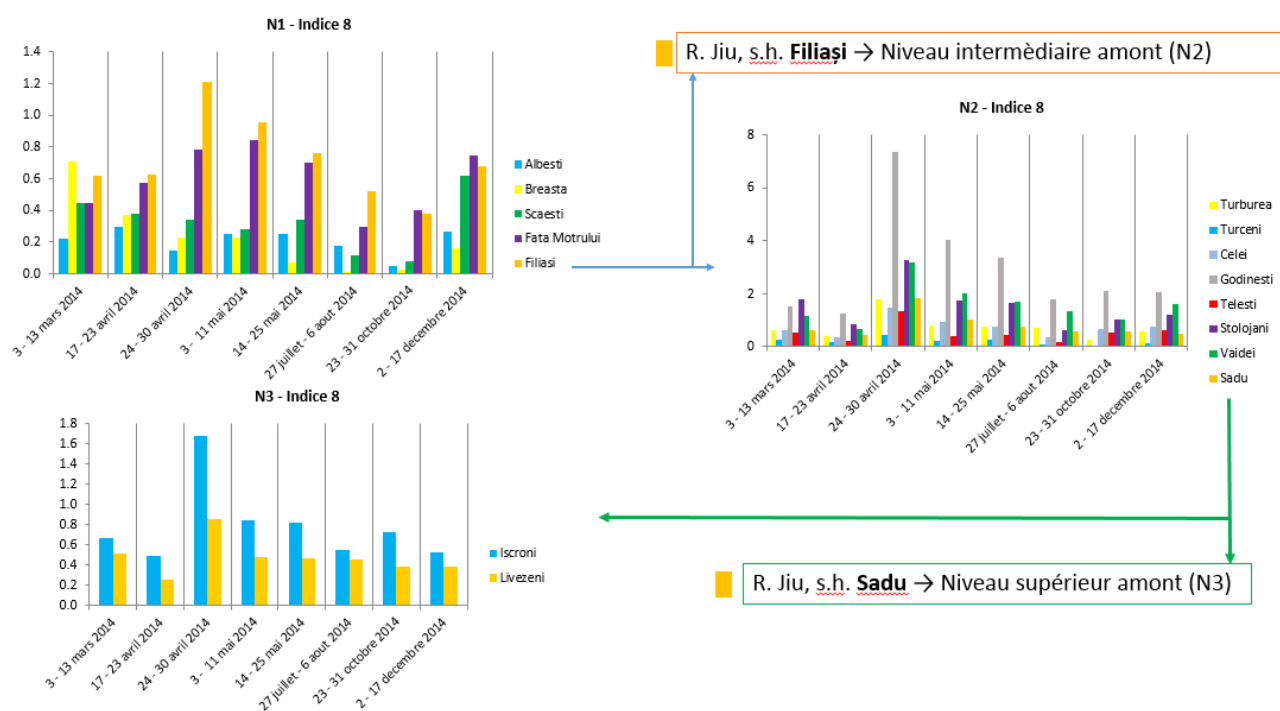
<sup>37</sup> Le dénominateur du rapport est dans ce cas le volume total des 27 crues analysées, qui correspondent à la période 2002 – 2014, mais une application ultérieure de cet indice (pour des périodes d'analyse plus étendues) peut ajuster cette valeur du volume total en fonction du nombre de crues envisagées.

précis, mais on le voit diminué par rapport aux autres indices. Il est plutôt visible en aval (N<sub>1</sub>) lors des crues d'avril et de décembre (crues 2, 4 et 8), au niveau 2 (N<sub>2</sub>), toujours lors de la crue 8, tandis qu'en amont (N<sub>3</sub>), les valeurs de l'indice lors de la crue 8 sont les plus bas en général. On confirme ainsi que la crue 8 ne vient pas de l'amont (N<sub>3</sub>). En corroborant quelques indices, on peut apprécier le secteur supérieur (N<sub>3</sub>) contribue plutôt pour les crues 3 et 6.

#### 7.4.3.1.8. Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)

L'indice 8 (**Figure VII.39**) reprend une notion bien connue dans les sciences hydrologiques, à savoir la relation entre la pluie et l'écoulement, exprimée comme le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée susceptible d'avoir entraîné des sédiments fins et la hauteur d'eau précipitée dans un intervalle de temps, uniformément réparties sur chaque bassin versant, lors de chaque crue. Cet indice est adimensionnel et caractérise la partie de la pluie qui participe directement à l'écoulement, d'où le terme de « pluie nette ». La formule employée est la suivante :

$$I_8 = \frac{V_{\text{hauteur d'eau ruisselée}}}{V_{\text{hauteur d'eau précipitée}}}$$



**Figure VII.39.** L'indice 8 pour les trois niveaux d'analyse

Les valeurs de l'indice en question ne signifient pas dans tous les cas que la totalité de l'écoulement est générée par les précipitations qui ont été prises en compte, car il y a d'autres processus intervenant (infiltration, évaporation, stockage). Par contre, lors des crues, une partie du volume d'eau peut toujours être issue de la réserve d'humidité assurée par les pluies antérieures, humidité qui persiste dans les bassins versant amont ou dans les réserves souterraines bassin intermédiaire pour plus tard alimenter la rivière

Le contraste entre les petits et les grands bassins affluents est plus estompé, afin que nous puissions nous former une idée assez objective de la contribution réelle des affluents. L'avantage de cet indice réside dans le fait que le rapport entre le volume de l'eau participant à l'écoulement et la quantité de pluie entrant dans le système des petits bassins peut atteindre des valeurs comparables aux celles des plus grands bassins

du fait de l'homogénéité plus prononcée des premiers. Dans le cas des épisodes de crue extraordinaires, ce doit être des pluies intenses qui les a amplifiées, de sorte que l'effet de la pluie sur le ruissellement est plus évident dans les petits bassins.

Le coefficient de ruissellement met en évidence à la fois les grandes rivières (c'est le cas des stations Fața Motrului et Filiași de la Jiu en aval -  $N_1$ ), et du b.v. de Tismana en amont -  $N_2$ ) et les petits affluents (Raznic, Argetoaia -  $N_1$ ; Bistrița et Șușița -  $N_2$ ). La première crue est dominée, comme le montrent d'autres indices aussi, par la rivière Raznic et ensuite par un apport commun des rivières du niveau 2. La crue 2 semble être formée, comme démontré par les premières 3 indices, à l'aval (secteur inférieur -  $N_1$ ). On confirme également que la crue 3 du mois d'avril est formée dans la moitié occidentale du bassin versant de la Jiu; le coefficient atteint des grandes valeurs à tous les niveaux pour les affluents de droite: Motru, Tismana, Jiu de l'Ouest. Les deux crues suivantes du mois de mai (crues 4 et 5) ont les mêmes caractéristiques, avec de valeurs en ordre décroissante de l'indice, toujours dominée par les rivières occidentales. Les crues de juillet - août et d'octobre (crues 6 et 7) ont généralement des valeurs faibles aux tous les trois niveaux, ce qui signifie que, du moins selon l'indice 8, l'écoulement provient de partout, en même temps n'étant pas très importante par rapport aux autres crues. Finalement, la crue 8 semble provenir de l'aval (les valeurs de l'indice diminuent au fur et à mesure qu'on remonte vers les deux branches de la Jiu), ce qui est conforme à la majorité des autres indices.

Par conséquent, compte tenu des conditions météorologiques, la crue 3 de la fin du mois d'avril a eu des valeurs élevées de l'indice en raison du fait que les taux de précipitations ont été les plus bas de l'année. Cependant, la pluie nette, a été la plus élevée. Cela ne peut s'expliquer que par le fait que la crue s'est certainement formée dans les parties supérieures des affluents occidentaux de la rivière Jiu (Motru, Tismana et la Jiu de l'Ouest), où la fonte tardive de la neige, fin avril, s'est conjugué aux faibles précipitations et a alimenté le ruissellement.

Nous notons par contre que la situation est inverse les mois d'été, pour la crue 6 de juillet - août, quand l'écoulement a été faible en dépit de la consistance des précipitations. Ainsi, bien que les précipitations aient pu favoriser un écoulement abondant, le niveau élevé d'évapotranspiration et le déficit d'humidité dans le sol n'ont pas permis la formation de fortes crues.

D'ailleurs, la répartition des précipitations entre les parties ouest et est du bassin hydrographique de la rivière Jiu est différente en raison des conditions de formation de précipitations. Pour les crues entre avril et septembre, dans le secteur occidental de piémont (bassins des rivières Argetoaia, Motru, Jilț), les pluies sont plus rares que dans le reste du bassin de la rivière Jiu en raison d'influences méditerranéennes. Nous concluons que le régime de précipitations réparti différemment sur le côté gauche et droit de la Jiu, ainsi qu'ultérieurement entre les sous-bassins tributaires de la montagne (Jiu de l'Est et Jiu de l'Ouest) et ceux situés à des altitudes plus basses (de la Tismana, de la Gilort), peut marquer la formation et la propagation des vagues de crues.

Nous pouvons encore remarquer que la différence entre les contributions des rivières, est plus importante en octobre et en décembre (en faveur du bassin de Motru) en raison des pluies frontales d'automne généralisées, ayant lieu, le plus probablement, sur le fond de la circulation méditerranéenne. Ensuite, en ce qui concerne la période mars-avril, caractérisée par l'effet cumulatif de la fonte des neiges

et des pluies printanières sous l'influence de la circulation régionale occidentale, la contribution des rivières affluentes est plus équilibrée et on ne peut pas nécessairement distinguer une contribution importante des affluents. En revanche, lors de la crue de mai, la différence augmente à nouveau en faveur de la rivière Motru, plus riche en ressources d'eau en cette période, en raison de la plus grande contribution des petits affluents dans le secteur supérieur karstique. Ces derniers, après le remplissage des réservoirs souterrains karstiques, lors des deux mois précédents de crues, commencent à alimenter l'écoulement de surface, contribuant à l'augmentation du volume des crues se propageant sur la rivière collectrice, la Motru.

Bien qu'il ne parvienne pas à différencier clairement les apports des différents affluents, du fait que les précipitations ne sont pas toujours directement responsables de la formation de l'écoulement, entre ces deux variables (précipitation – écoulement) interférant d'autres paramètres climatiques et hydrologiques (humidité antérieure du sol, températures et évapotranspiration), nous pouvons utiliser cet indice avec quelques réserves, pour avoir un tableau général des ressources en eau disponibles dans les bassins versants des affluents.

#### **7.4.3.2. Indices considérant la période de débit de pointe comme durée de référence pour le calcul du volume débordant**

Nous présenterons par la suite le deuxième groupe d'indices, construits à partir du volume enregistré les jours où le débit à la station principale en aval (Podari, rivière Jiu) a dépassé le seuil de 600 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, au-dessus duquel la crue peut être considérée comme débordante, soit capable de contribuer aux processus d'accumulation sur les berges. Pour les stations hydrométriques des niveaux 2 et 3, il a également été pris en compte la veille du dépassement du seuil de Podari en raison de la durée supérieure d'un jour de la propagation de l'onde de crue des stations de l'amont à la station Podari.

#### **Contribution du volume total de la station par rapport au volume de la station de référence**

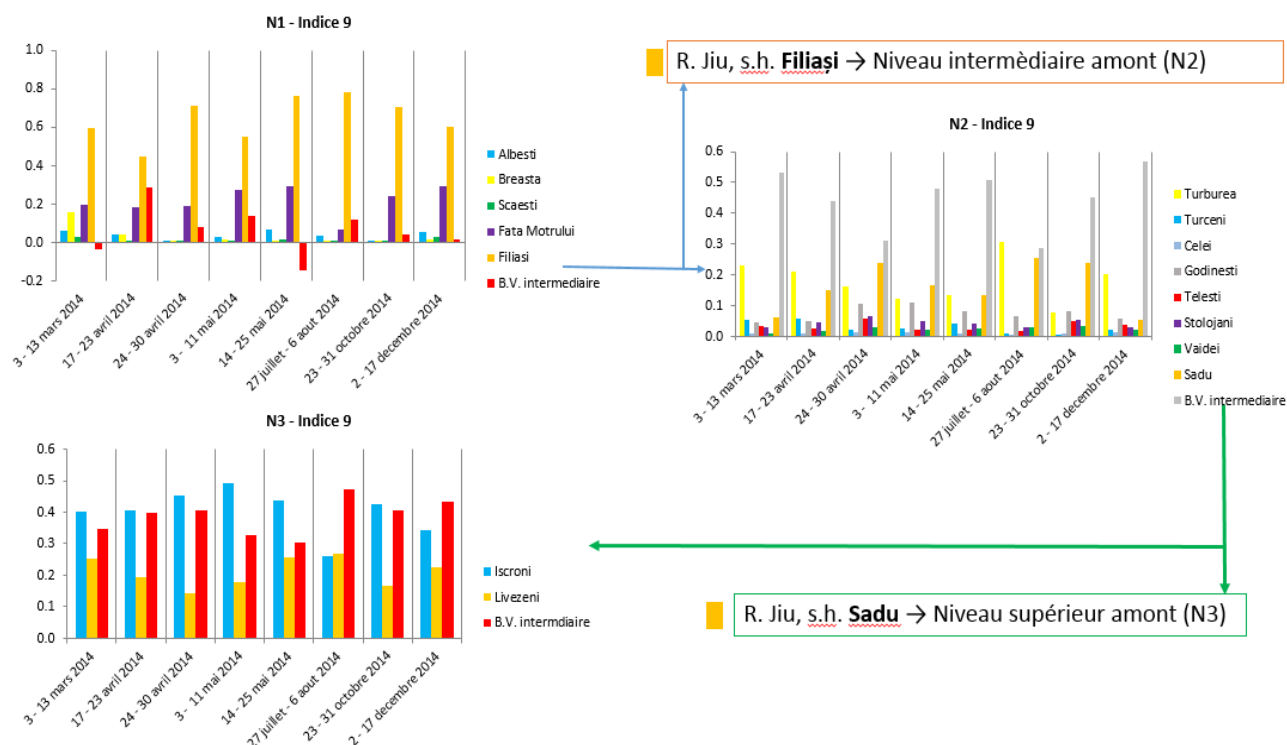
Cet indice est similaire à l'indice 1 de la première catégorie, à la différence du volume total qui est cette fois-ci le volume pendant les jours de pointe (et un ou deux jours avant, selon le secteur d'analyse) et non pas le volume total de la crue.

$$I_9 = \frac{V_{\text{jours}>600\_crue\_station\_x}}{V_{\text{jours}>600\_crue\_station\_référence}}$$

L'indice 9 reprend la formule du premier indice, à la différence qu'à cette fois le volume de la station en question et de la station de référence n'est pas le total pour toute la durée de la crue, mais seulement pour les jours avec un débit supérieur à 600 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Il confirme ainsi l'indice 1 (même construction, mêmes équations), avec une exception pour le bassin versant intermédiaire 1 (B.I.<sub>1</sub>), qui a une valeur encore plus large sur le côté négatif du graphique (crue 1 et crue 5). Ça peut s'expliquer par le fait que, pendant les jours où le volume est supérieur à 600 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, le B.I.<sub>1</sub> stocke le surplus et ne contribue pas à l'écoulement en aval, mais la situation est réglée jusqu'à la fin de la crue, quand il commence à éliminer l'eau par ruissellement. Ce n'est pas de toute la même situation en amont, où les B.I.<sub>2</sub> et B.I.<sub>3</sub> contribuent de façon indépendante, même pendant la courte période de débits de pointe.

Cet indice présente l'avantage de mieux souligner la contribution effective des affluents et des bassins intermédiaires lors des pointes des crues. Il est ainsi possible de déterminer avec plus de précision

les crues alimentées par les bassins des niveaux supérieurs (N<sub>2</sub> et N<sub>3</sub>) par rapport à celles qui se sont formées principalement en aval (N<sub>1</sub>). La crue 3 en est un bon exemple dans ce sens. Les affluents de la rivière Jiu ne semblent pas avoir apporté un volume d'eau extrêmement important (l'indice est plus bas que pour les autres crues pour tous les affluents de N<sub>1</sub> et N<sub>2</sub>), mais les deux stations de la rivière Jiu (Filiași et Sadu) sont mises en évidence par de grandes valeurs (*Figure VII.40*).



**Figure VII.40.** L'indice 9 pour les trois niveaux d'analyse

### Contribution en volume relatif au volume total amont (%)

L'indice 10 est construit de la même façon que l'indice 2, à la différence du volume restreint aux jours avec un débit supérieur à 600 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> :

$$I_{10} = \frac{V_{jours>600\_crue\_station\_x}}{V_{jours>600\_stations\ amont}}$$

L'avantage de l'indice 10 est le même que celui de l'indice 9. On remarque également le bassin intermédiaire B.I.<sub>1</sub> avec des valeurs négatives plus prononcées pour la crue 5, confirmant le rôle de la zone de stockage et d'atténuation des crues que l'espace entre les stations hydrométriques sur les affluents et la rivière Jiu offre (*Figure VII.41*). Cela se produit, bien sûr, uniquement au niveau 1, où la plaine inondable de la rivière Jiu se comporte comme un réservoir temporaire pour l'excès d'eau lors des pics de crue. Différentes informations par rapport à l'indice précédent le ramène-t-il en ce qui concerne l'apport du bassin de la rivière Gilort (s.h. Turburea), qui apparaît dans la plupart des épisodes de crue (surtout lors de la première crue) comme le plus important contributeur, dépassant l'apport de la rivière Tismana.



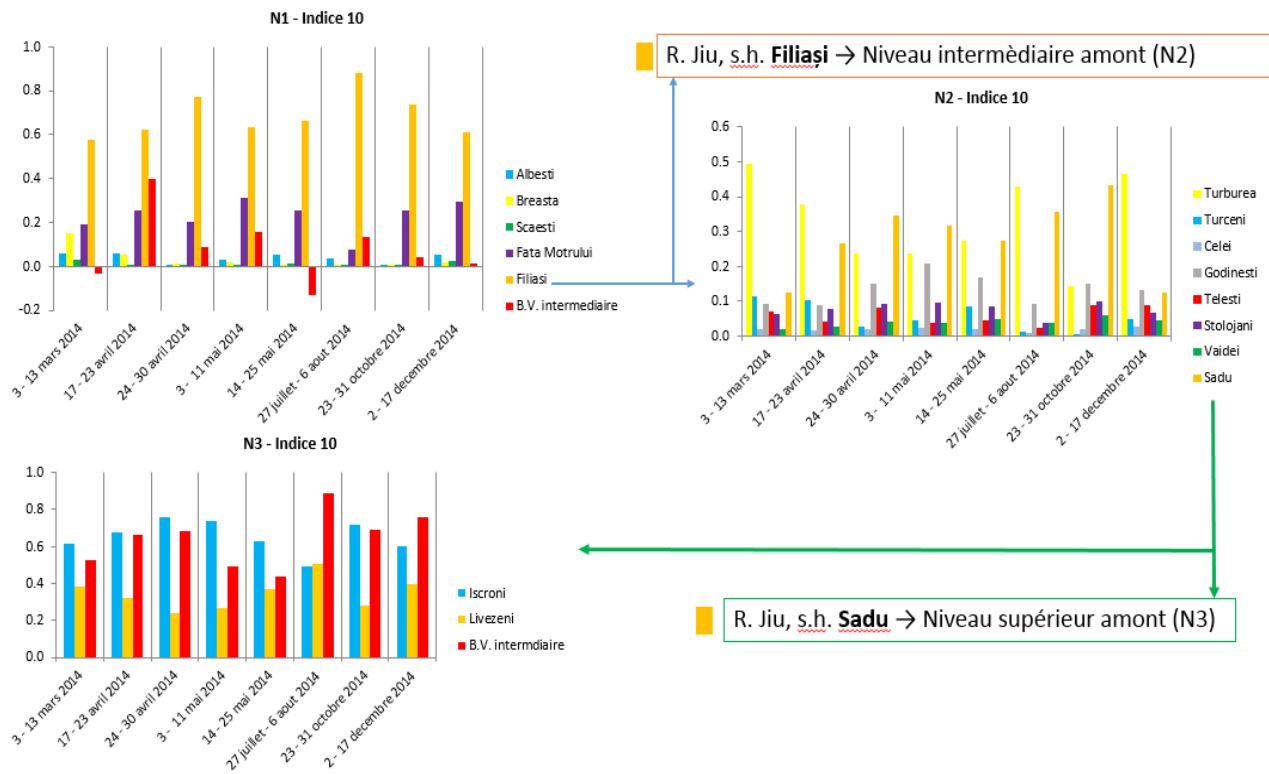


Figure VII.41. L'indice 10 pour les trois niveaux d'analyse

### Lame d'eau totale ruisselée (mm)

La définition de cet indice est la même qu'au indice 3, à différence que cette fois on utilise le volume dans les jours où le débit a dépassé  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . En reprenant la formule de l'indice 3 pour cette tranche du volume, on peut la réécrire de façon suivante :

$$I_{11} = \frac{V_{>600\_crue\_station\_x}}{Superficie_{bassin\_versant\_à\_la\_station}} 1000$$

Les résultats pour les crues de 2014 sont illustrés dans la **Figure VII.42**. Nous constatons que cet indice accentue encore les différences entre les affluents principaux et secondaires, dans le sens où les petits bassins semblent avoir davantage contribué. Comme indiqué par l'index 3, des valeurs élevées en faveur de petits bassins peuvent être utiles pour mettre en évidence les contributions des affluents secondaire, mais également trompeuses, en les rendant trop visibles. Nous rappelons que les valeurs négatives de B.I.<sub>1</sub> ne signifient pas qu'il n'y eu lieu de l'écoulement, mais que la couche d'eau a été stockée pendant les pics de la crue et que rien de plus dans le volume ne s'est plus formée en dehors du stockage de l'eau arrivée de l'amont.

Le point fort de cet indice est d'indiquer à travers de l'écart entre les valeurs à chaque station au moins une crue plus importante pour chaque bassin versant, indifféremment de leur taille. Comme titre d'exemple, selon cet indice la crue 1 semble être dominée par la rivière Breasta (N<sub>1</sub>) et par la rivière Jilț (N<sub>2</sub>), la crue 2 par le bassin intermédiaire 1 et toujours la rivière Jilț, la crue 3 par la rivière Bistrița, la crue 4 par la rivière Jilț, de nouveau, ainsi que la crue 5 et la crue 6 par la rivière Gilort. Lors de la crue 7 il y a des contributions de partout et rien dominant d'un certain bassin versant, tandis que la crue 8 semble provenir notamment des rivières Motru et Argetoaia.

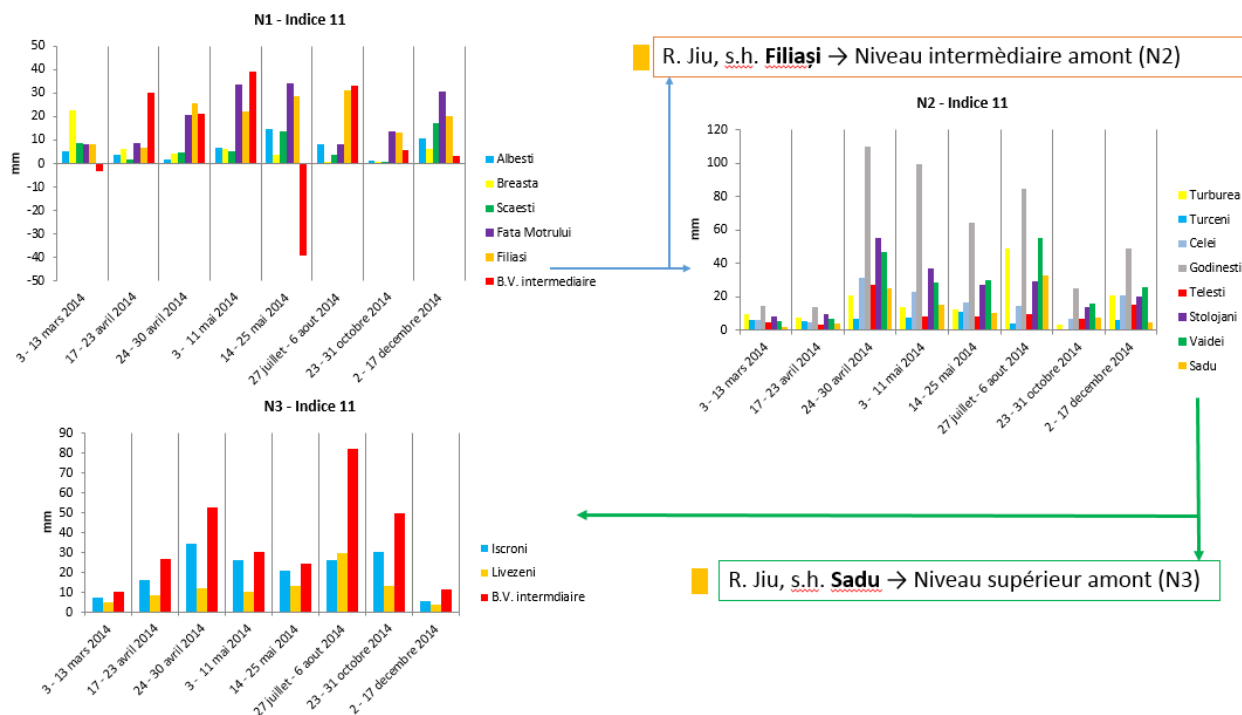


Figure VII.42. L'indice 11 pour les trois niveaux d'analyse

### Volume de la crue/ volume annuel de la même station

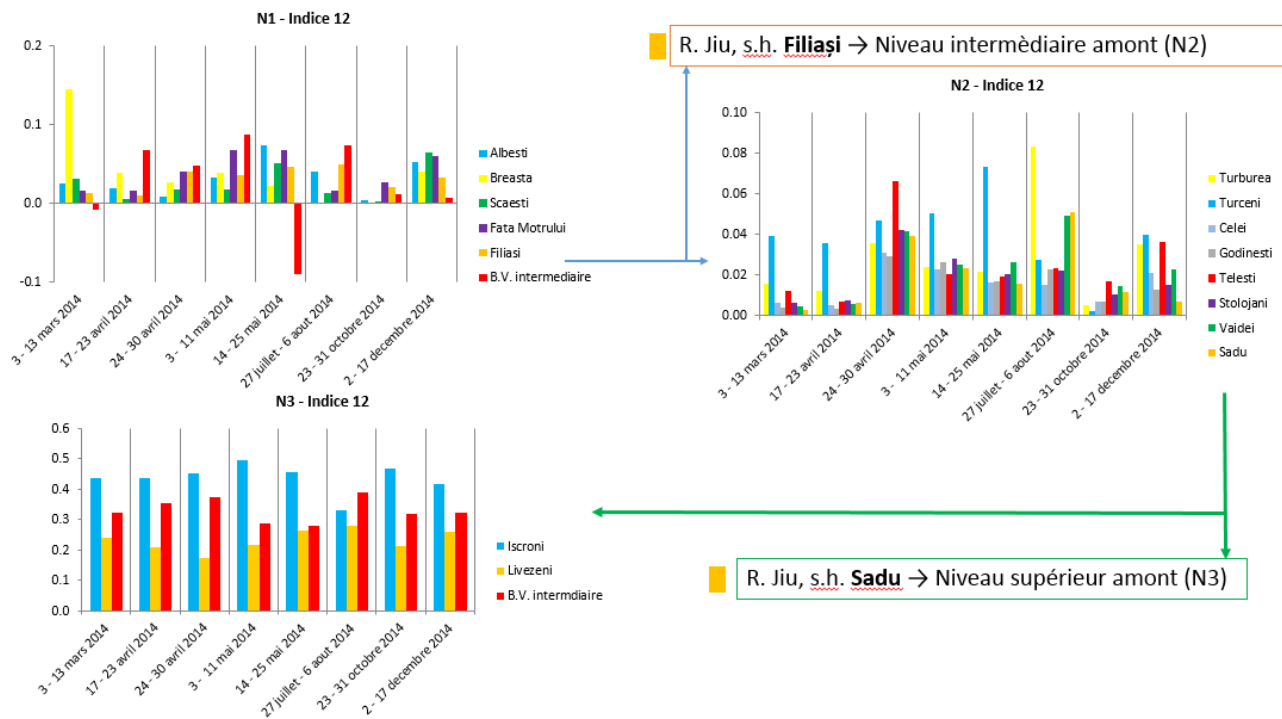
L'indice 12 est construit selon le modèle de l'indice 5, en considérant que les jours à débit supérieur à  $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour la station principale de référence aval – Podari. On illustre les résultats de cet indice dans la Figure VII.43.

$$I_{12} = \frac{V_{\text{jours} > 600 \text{ crue station } x}}{V_{\text{jours} > 600 \text{ même année - station } x}}$$

L'indice 12 montre les plus importantes crues de l'année 2014 pour chacune des stations hydrométriques considérées :

- s.h. Breasta, rivière Raznic – crue 1 ;
- s.h. Scaiești, rivière Argetoaia - crue 8 ;
- s.h. Albești, rivière Amaradia – crue 5 ;
- s.h. Fața Motrului, rivière Motru – crues 4 et 5 ;
- s.h. Filași, rivière Jiu – crue 6 ;
- s.h. Turburea, rivière Gilort – crue 6 ;
- s.h. Turceni, rivière Jiț – crue 5 ;
- la rivière Tismana – crue 3 ;
- s.h. Stolojani, rivière Runcu - crue 3 ;
- s.h. Telești, rivière Bistrița – crue 3 ;
- s.h. Vaidei, rivière Șușița – crue 6 ;
- s.h. Iscroni, rivière Jiu de l'Ouest – crue 4 ;
- s.h. Livezeni, rivière Jiu de l'Est – crue 6.

L'avantage de cet indice est caché dans les résultats pour les crues avec des valeurs basses généralisées. Cela peut indiquer une origine mixte, à tous les niveaux, du volume de la crue, car il n'y a pas d'affluent pour dominer les apports.



**Figure VII.43.** L'indice 12 pour les trois niveaux d'analyse

Le *risque* de cet indice peut être qu'il ne peut pas afficher qu'une valeur, maximum deux, les plus élevées pour une station, et en fait, le bassin en amont de celui-ci a peut-être contribué de manière substantielle au cours de plusieurs crues. En outre, pour les plus grands affluents, un autre risque ne serait qu'aucune des crues ne soit différente des autres et que son indice présente des valeurs similaires pour toutes les inondations de l'année. Cela ne signifie toutefois pas que l'affluent n'a pas contribué, mais qu'il a généralement une contribution considérable et que les crues sont tout aussi importantes dans le cas présent.

#### Coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ hauteur d'eau précipitée)

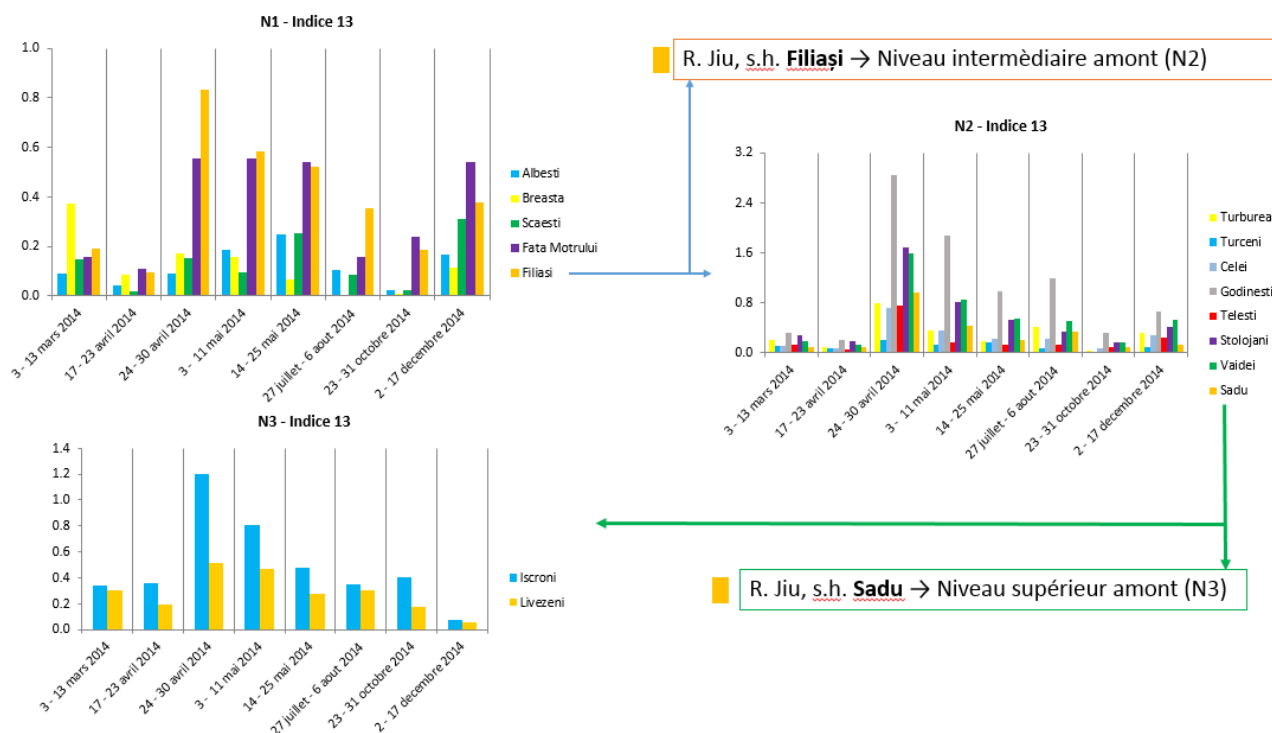
L'indice 13 se calcule de la même façon que l'indice 8, mais seulement le volume de l'eau et la quantité de pluies en relation avec les débits dépassant  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à la station de référence aval de Podari sont considérées. En ce qui concerne le calcul du cumul de précipitations au-dessus du seuil de débit, il convient de noter qu'elles ont été prises en compte lors de certaines crues quelques jours avant l'enregistrement du volume d'eau maximal. À titre d'exemple, si le jour "n" à la station hydrométrique Podari le débit a dépassé  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et la distribution des précipitations en amont montre un maximum 2-3 jours avant (jours n-2 ou n-3), le calcul du cumul de précipitations est considéré comme le jour du début de cette période qui a ensuite déclenché le maximum d'écoulement et pas seulement le ou les jours mêmes de lu débit  $>600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Le principe sur lequel repose la formule est celui de la relation génétique entre pluie et écoulement, et pas nécessairement mathématique, ce qui aurait signifié une coïncidence totale des jours des volumes de l'eau et les précipitations.

$$I_{13} = \frac{V_{\text{hauteur d'eau ruisselée jours } > 600 \text{ à Podari}}}{V_{\text{hauteur d'eau précipitée jours } > 600 \text{ à Podari}}}$$

La pertinence de cet indice apparaît particulièrement au cours des crues dominées par un volume véritablement important d'un affluent. Si cet affluent a le plus contribué à la formation du volume de la crue en aval, par rapport à d'autres affluents, cela se verra dans la taille de l'indice, c'est-à-dire lorsque le volume

de l'écoulement a pu dépasser la quantité de précipitations considérée comme étant a priori génétiquement responsable de la propagation de la crue.

L'indice 13 indique donc les contributeurs les plus importants à chaque crue, comme suit (**Figure VII.44**):



**Figure VII.44.** L'indice 13 pour les trois niveaux d'analyse

Crue 1 – une crue de l'aval (bassin inférieur de la Jiu) surtout, dominée par la rivière Raznic et en moindre mesure par la Motru et le Jiu aval ;

Crue 2 – toujours une crue de l'aval (bassin inférieur de la Jiu) sans une contribution importante d'un certain affluent ;

Crue 3 – une crue mixte, avec des maxima absolus à tous les trois niveaux :  $N_1$  – dominé par la Jiu aval et par la rivière Motru ; plus en amont (au  $N_2$ ) ce sont les rivières Tismana, Runcu et Șușița (le secteur subcarpatique du côté droit de la Jiu) qui contribuent le plus, tandis qu'en amont ( $N_3$ ) c'est la Jiu de l'Ouest ;

Crue 4 – la même distribution des contributions comme pour la crue 3, mais avec des valeurs plus petites ;

Crue 5 – une crue du secteur inférieur toujours, avec les rivières Motru, Jiu entre Filiași et Podari et l'Amaradia qui contribuent le plus ;

Crue 6 – une crue du secteur moyen du bassin de la rivière Jiu, avec la Jiu à Filiași de plus grande contribution au  $N_1$  et la Tismana au  $N_2$  ;

Crue 7 – une crue dominée par la rivière Motru ;

Crue 8 – une crue du bassin inférieur de la Jiu, dominée en ordre décroissante par les rivières Motru, la Jiu à Filiași et l'Argetoaia.

En conclusion, le coefficient de ruissellement met de nouveau en évidence les plus grands bassins affluents et confirme la contribution massive de l'aval (secteur inférieur) et du secteur moyen pour les crues 4 et 8, de l'aval seulement pour la crue 1 et de partout pour la crue 3.

## 7.4.4. Discussion sur les indices de crue

### 7.4.4.1. Critères d'évaluation des indices de crue

Afin de formuler des conclusions générales sur les indices créés et de répondre à l'objectif général de ce chapitre, de réduire leur nombre et de ne retenir qu'une partie d'entre eux réellement utiles, nous estimons qu'il convient de répertorier quelques critères sur la base desquels ils seront élus :

- *L'importance accordée aux bassins tributaires en fonction de leur taille* – doit être un des principaux critères, de sorte que les indices finalement retenus valorisent à la fois les plus grands affluents, dont on s'attend à une contribution majeure pendant une crue, ainsi que les plus petits, dont les débits moyens ont une contribution négligeable le reste de l'année, mais quand même importante pendant certaines crues.

- *Les stations intermédiaires sur la rivière Jiu (Filiași et Sadu)* – la démarche de décomposition du bassin de la rivière Jiu en trois niveaux a fortement dépendu des stations hydrométriques disponibles avec des données hydrologiques fiables. L'intérêt de la décomposition en trois niveaux a été de simplifier le schéma des affluents participants à l'écoulement lors des crues et de passer au niveau suivant seulement dans les cas où l'information aux niveaux inférieures ne suffit pas et que la crue a été aussi formée par des contributions de l'amont.

Ainsi, les trois stations hydrométriques sur la rivière Jiu (Podari, Filiași et Sadu) ont été choisies pour marquer la transition entre les trois secteurs morphologiques du bassin: s.h. Sadu se trouve à l'aval du secteur montagneux et contrôle les contributions de la Jiu de l'Est et de la Jiu de l'Ouest dont la jonction résulte la rivière Jiu; s.h. Filiași contrôle l'apport des rivières subcarpathiques et de piémont, à l'exception de la rivière Motru (qui a son bassin supérieur dans la région montagneuse) ; et Podari est la station principale située au niveau le plus bas, dans la région de plaine. Le dernier secteur, en aval de Podari jusqu'à l'embouchure, ne nous a pas intéressé ; son analyse n'aide pas à améliorer la connaissance des sources d'alluvions acquises dans les secteurs en amont.

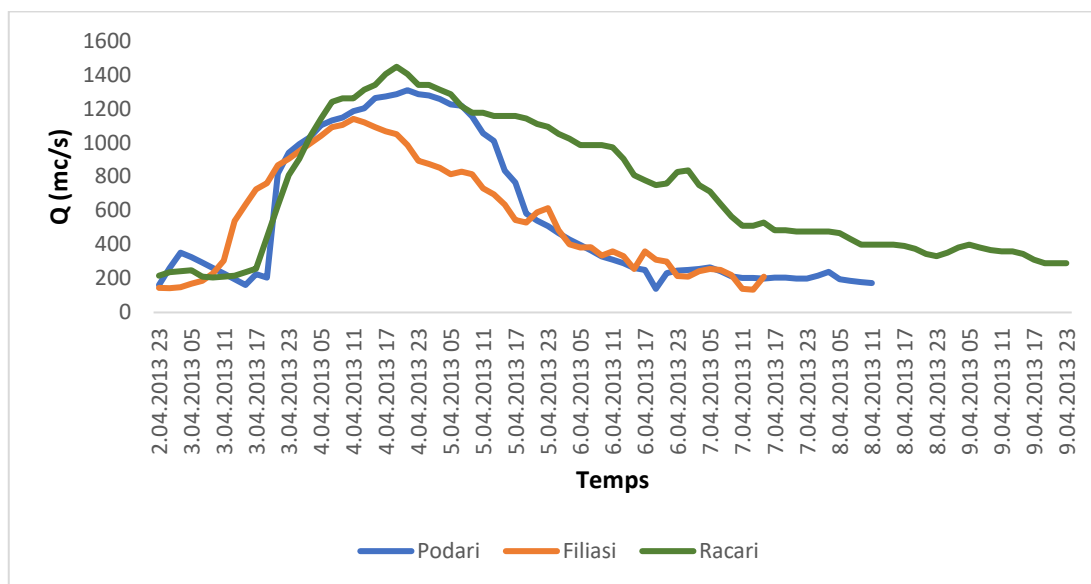
Pour finir sur la question des stations analysées sur la rivière Jiu et des trois niveaux, il convient de noter qu'ils n'ont pas tous le même degré de complexité et d'homogénéité en termes d'apports hydro-sédimentaires. En plus, le temps de transfert ne coïncide pas toujours, mais on a gardé les mêmes dates de début et de fin des épisodes de crue pour que ça soit comparable entre les trois niveaux d'analyse.

- *Le bassin hydrographique intermédiaire* représente la superficie entre les bassins versant amont et la station de référence envisagée pour chacun des 3 niveaux d'analyse (voir §7.3.5.2.). Les différences entre le volume qui arrive à la station de référence en aval correspondent au volume du bassin versant intermédiaire et à celui qui vient de l'amont (la somme de toutes les contributions des bassins versants affluents considérés à chaque niveau d'analyse). Le signe négatif ou positif du volume du bassin intermédiaire indique le phénomène prépondérant de stockage (atténuation de la crue) ou l'apport complémentaire des affluents non-jaugés, des parties des bassins versants affluents en aval des stations de



mesures considérées, ou bien d'une pluie persistante sur toute l'aire entre la station amont et la station de référence aval. Par conséquent, le bassin intermédiaire joue un double rôle dans cette analyse, qui découle à la fois de la nature de la zone tampon d'atténuation des inondations (stockage intermédiaire dans le secteur en aval et atténuation du débit de pointe) et de sa structure composée des secteurs en aval des bassins versants tributaires).

Dans la **Figure VII.45** le phénomène d'atténuation est illustré, lors de la crue d'avril 2013. Il est évident notamment durant la période de montée des eaux. A partir d'une certaine durée, on ne constate plus l'effet d'atténuation.



**Figure VII.45.** Atténuation du débit de pointe de la crue d'avril 2013 sur la rivière Jiu entre les stations hydrométriques de Filiași, Răcari et Podari

Pour les trois niveaux d'analyse, la superficie des bassins intermédiaires est très variable : 739 km<sup>2</sup> - le B.I.<sub>1</sub> de N<sub>1</sub>; 1554 km<sup>2</sup> - le B.I.<sub>2</sub> de N<sub>2</sub>, respectivement 293 km<sup>2</sup> - le B.I.<sub>3</sub> en N<sub>3</sub>. De plus, la morphologie et la lithologie diffèrent beaucoup, de sorte qu'en N<sub>1</sub> le bassin intermédiaire est davantage représenté par la plaine inondable et les terrasses de la rivière Jiu et de ses affluents. Ce bassin intermédiaire développé sur un substrat de sables et de graviers hautement perméables, caractéristiques qui le rendent plus homogène. En N<sub>2</sub>, le bassin intermédiaire s'étale sur les plaines inondables avec un substrat plus grossier à l'issue du Piémont Gétique et des Sous-Carpates, tandis que le bassin intermédiaire du secteur N<sub>3</sub> correspond au secteur des gorges de la Jiu, creusées dans les roches dures, sans possibilité de divagation de la rivière ou pour le développement de la plaine inondable dans laquelle le surplus d'eau peut être stocké. D'où un rôle différencié du bassin intermédiaire.

Nous nous attendons à ce que, la région montagneuse de la N<sub>3</sub> contribue toujours avec un volume assez important, compte tenu de la pluviométrie, des pentes des rivières et des conditions lithologiques et géomorphologiques favorisant l'écoulement. En N<sub>2</sub>, nous nous attendons au stockage et à l'atténuation des volumes maximaux des crues dus aux aménagements hydro-énergétiques et aux prélèvements d'eau pour l'industrie thermo-énergétique entre la ville de Târgu Jiu et la confluence avec la rivière Jilț. Dans N<sub>3</sub>, le principe serait que le bassin intermédiaire contribue uniquement au volume formé par les affluents entre les stations hydrométriques et la rivière Jiu et en très petite mesure à son propre volume de production. Etant un chenal fluvial à forte pente, il présente des vitesses d'écoulement si élevées qu'on n'y observe

aucune atténuation. Il convient de mentionner à ce point que la superficie des bassins intermédiaires dans les calculs des indices a été considérée de manière globale<sup>38</sup>, et non comme la somme des surfaces partielles restantes de chaque bassin tributaire. Par conséquent, nous ne pouvons pas savoir dans quelle mesure le volume auquel contribue un bassin intermédiaire est dû à la contribution de l'un ou l'autre des affluents.

- *Ordre des affluents et le niveau de détail de l'analyse.* Nous rappelons que l'objectif de ces indices est d'analyser les apports d'eau lors des crues susceptibles de déposer des sédiments fins sur la berge d'accumulation enquêtée. À cet égard, l'hypothèse de travail a été qu'à un bassin hydrographique affluent correspond automatiquement une capacité de transport directement proportionnelle au volume ou au débit maximal. L'hypothèse formulée est cependant très simpliste, ne tenant pas compte du potentiel érosif des versants et des sources d'alluvions des bassins considérés dans l'analyse. On ne connaît pas non plus les volumes d'alluvions déposés dans les zones de stockage intermédiaires, tels que les réservoirs et les formes de relief dans les lits des rivières. Enfin et surtout, les bassins tributaires ont été analysés dans leur ensemble et non discrédités dans des sous-secteurs. Dans ces conditions, une telle approche des indices uniquement au niveau des entrées des principaux affluents en fonction des débits enregistrés aux stations hydrométriques les plus en aval et au plus proche de la confluence avec la rivière Jiu met seulement en perspectives le système fluvial en question, ne pas présentant en détail les contributions des tributaires de différents ordres. Nous reconnaissons dans ce contexte le potentiel d'amélioration d'une telle analyse en incluant plusieurs stations hydrométriques dans différents secteurs tributaires des affluents de premier ordre de la rivière Jiu.

#### **7.4.4.2. Considération sur la pertinence des indices**

Pour un aperçu général sur les indicateurs, on les a divisés en deux catégories : 1) les indices qui se construisent à partir des pluies généralisées, en utilisant dans le calcul tout le volume de la crue ; 2) les indices construits seulement à partir du volume pendant les jours où le débit a été supérieur au seuil fixé de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

On constate que les indices ne sont pas pertinents pour toutes les crues, à cause de plusieurs raisons :

- Des décalages du temps entre les débits de pointe aux stations hydrométriques considérées ;
- Des caractéristiques des bassins versants, favorisant ou freinant le ruissellement et le transfert des sédiments fins dans les rivières ;
- En termes de saisonnalité des crues, on a vu que la plupart se sont produites en printemps sur le fond des pluies extensives et des fontes de neiges, mais les volumes maximaux correspondent aux crues de fin de mai et de décembre. En outre, on n'a pas cherché le lien entre la saison de la crue et la probabilité de dépôt des sédiments fins, mais ça sera une piste à suivre dans les perspectives de cette étude.
- La robustesse des calculs n'est pas toujours évidente. On perd en précision avec le volume total, mais on simplifie la démarche de délimitation d'une crue en considérant la même longueur à toutes les stations comme à la station principale de Podari.

---

<sup>38</sup> Pour chacun des 3 niveaux d'analyse, la superficie du bassin intermédiaire a été celui totale, englobant en gros toutes les superficies des sous-bassins entre la station hydrométrique la plus en aval et la rivière Jiu

De plus, on se pose la question sur la justesse de l'utilisation du volume correspondant au débit de pointe seulement. La réponse se partage entre deux situations : *a*) quand la crue est généralisée et qu'elle vient de partout le bassin versant à la fois, à cause des possibles décalages de temps entre amont et aval, on considère que c'est plus correct d'utiliser tout le volume ; *b*) une petite crue qui ne concerne qu'une partie du bassin versant ou un seul affluent, se prêterait plutôt aux indices construits avec le volume de pointe.

Cependant, il ne faut pas oublier qu'on a implémenté cette méthodologie pour lier les dépôts de sédiments fins avec les plus grandes crues qui les ont transportés. Dans ce contexte, les plus grosses crues n'ont – elles pas une plus grande probabilité d'avoir déposé les sédiments fins en suspension ?

\*\*\*

Une série d'observations doit également être faite sur les indices qui utilisent uniquement le volume des jours où à Podari la rivière Jiu a enregistré un débit de plus de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Bien que nous reconnaissons la plaidoirie de la construction d'indices en utilisant uniquement le volume cumulé jusqu'au moment où le débit diminue au – dessous du seuil de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la valeur ajoutée aux indices précédents ne serait peut-être pas très élevée. En général, nous avons observé 2 types d'évolutions du volume au cours des crues de la station Podari, nous permettant de juger de la nécessité d'index supplémentaires basés sur le volume cumulé jusqu'à ce que le flux descende sous  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ :

1) Au cours des plus petites crues, avec des débits de pointe compris entre  $600$  et  $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , les maxima sont enregistrés plus tard, la période de croissance de la crue étant plus longue. Dans ces cas, après le maximum, il peut y avoir seulement un autre jour avec des débits au-dessus de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Après, il y a la possibilité d'arrêter le cumul du volume, compte tenu que la période de dépôt des sédiments fins en aval du s.h. Podari a dû avoir pris fin (le débit n'est pas assez élevé pour atteindre un certain niveau de la rive afin de déposer les sédiments). Cependant, ces types de crues ont un temps de descente plus court après le jour du dernier débit supérieur à  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Par conséquent, le volume supplémentaire cumulé au cours de ces derniers jours n'affecte pas le calcul et l'appréciation des indices développés sur le volume total de la crue.

2) Au cours des plus grandes crues avec débits dépassant  $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à Podari, l'augmentation du temps des crues est beaucoup plus courte, le débit de pointe pouvant se produire dans le 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> jour après le début de la crue. Après ces maxima, le débit diminue lentement pour atteindre le seuil de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  au bout de plusieurs jours de plus que dans le cas de petites crues. Il existe également des crues dont un pic secondaire dépasse toujours  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , même à la fin de la crue pendant la période descendante, ce qui ne nous permet pas de couper la crue immédiatement après le premier pic enregistré et d'utiliser uniquement le volume cumulé jusque-là. Dans le cas de ces types de crues qui durent plus longtemps, il est possible que le volume total cumulé de la crue soit bien supérieur au volume obtenu uniquement pendant les jours avant que le débit soit tombé au-dessous de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  et alors, un indice de volume partiel ( $Q > 600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) pourrait être approprié.

Cependant, d'autres problèmes de stockage intermédiaire avant la fin de la crue peuvent compliquer l'analyse, en donnant trop de sens au bassin intermédiaire dans son rôle d'atténuer le pic de la crue et de stocker une partie importante du volume transité. Pour une généralisation plus précise des indices, qui doivent être robustes et appliqués uniformément aux trois niveaux établis (bassin inférieur, moyen et

supérieur de la rivière Jiu), nous ne pouvons pas accorder une attention bien méritée aux bassins intermédiaires, car nous ne disposons pas d'informations sur les débits et les volumes pendant la crue. On peut uniquement se servir des estimations basées sur la différence entre les apports d'amont et les volumes de la station de référence en aval.

Par conséquent, nous considérons que l'extension de la liste d'index avec quelques références aux volumes cumulés jusqu'à ce que le débit descende au-dessous de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , bien que plus réaliste du point de vue de la relation *débit - augmentation du niveau - dépôt de sédiments fins*, rendrait notre approche encore plus compliquée et devrait être laissée en réserve/ perspective.

À partir de tous les indices présentés ci-dessus, nous formulons quelques remarques générales sur la répartition de leurs valeurs en fonction de la saison, de l'importance du bassin intermédiaire, du nombre de sous-bassins considérés et de la station de référence en aval.

#### **7.4.4.3. Synthèse des indices appliqués sur toutes les 27 crues analysées**

À partir de tous les indices présentés ci-dessus, nous formulons quelques remarques générales sur l'opportunité de leur utilisation, en fonction de la répartition de leurs valeurs en fonction de la saison, de l'importance du bassin intermédiaire, du nombre de sous-bassins considérés et de la station de référence en aval.

Le sous-chapitre précédent a permis de préciser les considérants hydrologiques au choix des crues susceptibles à avoir déposé les couches sédimentaires et, par conséquent, d'établir lesquelles des crues qui ont eu lieu dans les dernières deux décennies ans ont été retenues pour la suite.

Dans ce qui suit, nous allons analyser toutes les 27 crues retenues en utilisant les indices. L'approche est de les qualifier de sorte que les crues soient présentées en termes de leurs contributions par les indices choisis, avec le débit / le volume ordonnée. On suppose que les sédiments transportés et déposés proviennent du versant et on ignore les possibles remises en suspension des dépôts intermédiaires dans les lits. Les matériaux déposés sont en relation directe avec le débit liquide, comme on a démontré aux chapitres §6.1. et §6.3.5.

Etant donné leur nombre assez considérable et par raison de limite d'espace, nous allons caractériser les crues et les indices considérés sous-bassins versant de la rivière Jiu sous la forme d'un tableau résumatif (*Tableau VII.12*). Le numéro de la crue (de 1 à 27) est en ordre chronologique décroissante pour chaque année. Ainsi, la crue 1 (notée désormais C1) est la première crue de 2014, la crue 8 (C8) étant la dernière crue de 2014, du mois de décembre. Avec l'année précédente (2013), on reprend la numérotation (C9) avec la première crue de l'année et ainsi de suite. Avec cette méthode, on privilégie les années analysées, considérées plus tard dans l'analyse des sources sédimentaires en ordre décroissante à partir de la plus récente, et à l'intérieur d'une année, on commence la vérification avec la première crue qui est censée avoir plus de chances de déposer une couche sédimentaire que la suivante dont le niveau à atteindre sur la berge est imposé par la crue précédente (et par conséquent, il doit lui être supérieur).

**Tableau VII.12.** Synthèse des 27 crues : caractéristiques, provenance, indices les plus pertinents

No. Crue	Période	Débit de pointe (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Contribution synthèse	Contribution selon chaque indice
C1	3 - 13 mars 2014	809	Jiu de l'Est et de l'Ouest, Raznic et Runcu <i>S'il y a du charbon, il doit être plutôt de la houille</i>	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants (B.I.2 et B.I.3), Gilort, un peu moins la Motru et la Jiu de l'Ouest I3 : Runcu, Raznic, Șușița I5 : Jił et Raznic I7 : Argetoaia et Raznic I13 : Jiu de l'Est, Runcu et Raznic
C2	17 - 23 avril 2014	895	Tous les trois secteurs, surtout les petits affluents de N1 et N2. Un peu moins la Jiu de l'Ouest Le charbon est plutôt de type houille inférieure	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, un peu Gilort, un peu moins la Motru I3 : Runcu, Șușița, Gilort I5: Jił et Raznic I7: Argetoaia, Amaradia, Raznic I13: Jiu de l'Est, Runcu
C3	24 - 30 avril 2014	847	Bassin de la Tismana et Jiu de l'Ouest Un peu de houille	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, un peu Gilort, un peu moins la Motru I3 : Șușița, Runcu, Tismana et Jiu de l'Ouest I5 : Jił et Bistrița I7 : Jiu de l'Ouest I13 : Jiu de l'Est, Runcu et Șușița
C4	3 - 11 mai 2014	859	La crue vient de l'amont du secteur supérieur (la houille des deux côtes doit être un marqueur sédimentaire) La Motru contribue aussi	I1 (relatif) : Une crue de l'amont, dominée par B.I.3 et Jiu de l'Ouest et de l'Est, un peu Motru aussi I3 : Motru, Șușița, Runcu et Jiu de l'Ouest I5 : Motru I7 : Motru et Jiu de l'Ouest I13 : Jiu de l'Est, Runcu et Șușița
C5	14 - 25 mai 2014	944	Un peu de la Jił (peut-être un peu de lignite) Un peu de partout du secteur montagne (on s'attend déjà la houille aussi, mais pas beaucoup)	I1 (relatif) : Une crue de la Motru et du N <sub>2</sub> (Gilort et B.I.2), un peu moins de l'amont, dominée par B.I.3 et Jiu de l'Ouest I3 : Șușița, Runcu, Tismana I5 : Jił et Motru I7 : Argetoaia et Amaradia I13 : Jiu de l'Est, Runcu, Șușița, Motru
C6	27 juillet - 6 aout 2014	855	La Gilort contribue le plus (sans marque de charbon) La Jiu de l'Est (de la houille trouvée ?) Șușița de nouveau (sans charbon)	I1 (relatif) : Une crue de l'amont, dominée par B.I.3 et Jiu de l'Ouest et de l'Est, un peu Gilort aussi I3 : Gilort, Șușița, parties aval des rivières Jiu de l'Est et Jiu de l'Ouest I5 : Gilort et Șușița I7 : Gilort, Șușița, Amaradia Pietroasă et Jiu de l'Est I13 : Jiu de l'Est, Runcu, Șușița, Gilort



C7	23 - 31 octobre 2014	743	La crue vient surtout de l'amont. On devrait trouver du charbon (les deux types de houille) La Tismana et ses affluents aussi (il faut confronter avec les résultats de la géochimie)	I1 (relatif) : Clairement une crue de l'amont, Jiu de l'Ouest, B.I.3 et Jiu de l'Est I3 : Tismana, Șușița, Runcu, Jiu de l'Ouest I5 : Bitrita et Șușița I7 : Sadu, Jiu de l'Est et Jiu de l'Ouest, un peu Amaradia Pietroasă, Șușița et Tismana I13 : Jiu de l'Est, Tismana et Motru
C8	2 - 17 décembre 2014	1074	Une crue de l'aval (N1). Ne peut pas amener du charbon. Peut-être seulement celui remise en suspension du secteur amont, mais pas distinctif. On doit chercher des traces quand même. C'était la seconde crue comme débit	I1 (relatif) : Une crue de l'aval de N2, un peu Motru et Jiu de l'Ouest I3 : Tismana, Runcu, Șușița, Bistrița, Motru, I5: Bistrița, Motru et Amaradia I7 : Amaradia et Argetoiaia (confirmation de l'aval de N2) I13 : Șușița, Runcu et Motru
C9	22 février 2013 – 3 mars 2013	622	Une crue de l'aval (N1). Ne peut pas amener du charbon. Peut-être seulement celui remise en suspension du secteur amont, mais pas distinctif. Le bassin de la Tismana et plus contributif. Une crue pas très forte avec peu de chances d'avoir fait le dépôt	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, un peu Motru I3 : Tismana, Runcu, Motru, Bistrița I5: Bistrița, Jilț et Motru I7 : Motru, Jilț et aval de N2 I13 : Șușița, Runcu et Tismana
C10	10 - 21 mars 2013	766	Une crue de partout. On s'attend à plus d'houille et à un peu moins de lignite	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Motru I3 : Tismana, Șușița, Runcu I5: Bistrița, Jilț et Motru I7: Jiu amont, Jiu de l'Ouest, Șușița et Runcu I13 : Jiu de l'Est, Runcu, Tismana et Șușița
C11	02 – 12 avril 2013	1270	Une crue du N2 et du N3. De la houille peut-être on peut trouver, mais pas beaucoup. C'était la plus forte crue. On doit chercher quelque chose distinctif parce qu'elle doit eu avoir toutes les chances de déborder et déposer les sédiments	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Gilort I3 : Tismana, Șușița, Runcu I5: Bistrița, Runcu, Șușița et Motru I7 : Șușița I13 : Runcu, Tismana et Șușița
C12	17 – 26 février 2010	736	La Motru participe, la Jilț et on voit un peu de contribution de la Jiu de montagne aussi. On peut	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est, Motru et Gilort

			s'attendre à une quantité presque égale de lignite et houille. Quand même, une crue pas très forte	I3 : Tismana, Motru, Runcu I5 : Jilț et Raznic I7 : Jilț, Raznic et secteurs aval des b.v. du N1 I13 : Tismana, Jilț et Gilort
C13	24 janvier – 5 février 2009	813	Motru et les rivières de N2. Pas de charbon	I1 (relatif) : Jiu de l'Ouest et B.I.3, Jiu de l'Est, Motru et Gilort I3 : Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I5: Bistrița et Gilort I7: Tismana, Motru, Amaradia Pietroasă, Bistrița I13: Runcu, Tismana, Bistrița et Șușița
C14	08 – 19 novembre 2009	743	Jiu de l'Ouest (de la houille), Motru et Tismana (sans charbon).	I1 (relatif) : Jiu de l'Ouest et B.I.3, Motru, Gilort et Tismana I3 : Tismana, Șușița, Runcu, Bistrița I5: Bistrița, Runcu, Șușița et Motru I7 : Jiu de l'Ouest, Tismana, Amaradia Pietroasă I13: Runcu, Tismana, Bistrița et Șușița
C15	18 - 27 décembre 2008	617	Une crue des secteurs aval des N2 et N3, mais aussi un peu de Motru. Il doit avoir une signature de partout. Mais de toute façon la crue n'a pas été très forte. On ne croit pas qu'elle ait contribué au dépôt	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est, Motru et Gilort I3 : Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I5: Bistrița, Jilț et Motru I7 : Bistrița et Motru I13: Jiu de l'Ouest, Runcu, Tismana, Bistrița et Șușița
C16	23 mars - 2 avril 2007	651	Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), un peu de partout. Dans chaque niveau il y a au moins une rivière qui contribue. Mais de toute façon la crue a été trop faible pour déposer des sédiments	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Gilort I3 : Tismana, Șușița, Runcu I5 : Bistrița, Șușița, Runcu, Fața Motrului I7 : Jiu de l'Est, Jiu de l'Ouest, Tismana, Amaradia Pietroasă (et un peu les secteurs aval des bassins intermédiaires I13 : Runcu, Tismana, Bistrița
C17	22 octobre – 5 novembre 2007	786	Une crue de l'amont, aussi que des bassins de la Tismana, de l'Amaradia et de la Gilort. Pas très bien distinguée. Une faible importance parmi les crues de toute façon	I1 (relatif) : B.I.3, Jiu de l'Ouest, Jiu de l'Est et Gilort I3 : Tismana, Runcu et Șușița I5 : Bistrița, Șușița, Runcu, Gilort, Amaradia I7: Amaradia et Amaradia Pietroasă I13 : Runcu, Tismana, Șușița
C18	15 – 26 novembre 2007	966	Une crue du N2 surtout. On peut trouver des traces de lignite de la Jilț et moins de la houille. On peut la garder pour l'analyse finale quand	I1 (relatif) : Les secteurs aval des bassins versants intermédiaires (B.I.2 et B.I.3), Motru et Gilort, un peu la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est, I3 : Tismana, Șușița, Runcu

			même, car le débit a été élevé.	I5 : Jilț, Motru, Raznic, Argetoaia et Amaradia I7 : Tismana et Amaradia I13 : Bistrița, Tismana, Șușița
C19	10 – 23 mars 2006	1022	C'est une crue dominée par la Jilț et les autres rivières de N2. Un peu Motru aussi. On s'attend à une quantité importante de lignite. Par le débit, elle occupe la troisième place.	I1 (relatif) : Motru et Gilort, un peu moins le B.I.3, la Jiu de l'Ouest I3 : Tismana, Runcu, Motru, Bistrița I5 : Jilț, Raznic, un peu Motru I7 : Jilț, Raznic et Argetoaia I13: Motru, Tismana et Bistrița
C20	11 – 19 avril 2006	830	Jiu de l'ouest et toute la partie occidentale du N2, sauf la Jilț. Donc on est à la recherche de la houille seulement	I1 (relatif) : Clairement Jiu de l'Ouest, après c'est la Gilort et un peu la Motru I3 : Jiu de l'Ouest, Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I5 : Bistrița, Șușița, Gilort et Raznic I7 : Jiu de l'Ouest et Jiu de l'Est, Bistrița I13 : Runcu, Tismana, Bistrița et Șușița
C21	10 – 20 juillet 2005	750	Une crue de l'amont (Ji de l'Ouest surtout), de Tismana et un peu de la Gilort.	I1 (relatif) : Clairement ces sont la Jiu de l'Ouest de l'Est et après c'est la Gilort I3 : Tismana, Jiu de l'Ouest, Runcu I5 : Gilort I7 : Jiu de l'Est, Jiu de l'Ouest, Amaradia Pietroasă I13 : Tismana et Bistrița
C22	15 aouts – 1 septembre 2005	875	Une crue formée dans les secteurs aval des bassins versants (N1). Dominée par la Gilort, la rivière Raznic et Amaradia et la Jilț	I1 (relatif) : la Jiu de l'Ouest de l'Est et après c'est la Gilort I3 : Tismana, Runcu, Raznic, les parties aval des bassins versants affluents I5 : Raznic et un peu Amaradia I7 : Jilț et Raznic I13 : Runcu, Tismana, Bistrița et Șușița
C23	25 février – 5 mars 2004	623	Une crue de l'aval de N2 surtout, mais elle peut aussi provenir de la Jiu de l'Ouest. On s'attend à un mélange de houille et de lignite Un débit très bas pour déposer des sédiments	I1 (relatif) : La Motru, la Gilort, la Jiu de l'Ouest I3 : Tismana, Gilort, Bistrița I5: Jilț et Raznic I7: Jilț, Raznic et Argetoaia I13: Jiu de l'Ouest et Jiu de l'Est
C24	8 – 13 novembre 2004	640	C'est clairement une crue du bassin de la Tismana et en moindre mesure de la Jiu de montagne. Si on trouve une marque, c'est très faiblement la houille. Une crue pas très importante de toute façon	I1 (relatif) : la Gilort, la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est I3 : Tismana, Șușița, Runcu, Bistrița I5: Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I7: Runcu, Tismana, Bistrița et Jiu de l'Ouest I13 : Runcu, Tismana, Bistrița et Jiu de l'Ouest

C25	14 -26 novembre 2004	834	C'est clairement une crue du bassin de la Tismana et en moindre mesure de la Jiu de montagne. Si on trouve une marque, c'est très faiblement la houille.	I1 (relatif) : la Gilort, la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est I3 : Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I5: Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I7: Runcu, Tismana, Bistrița et Șușița I13 : Runcu, Tismana, Bistrița, Jiu de l'Ouest
C26	12 – 27 avril 2003	713	Une crue surtout du N <sub>2</sub> . C'est possible de trouver les deux espèces de charbon, mais la crue n'est pas très importante	I1 (relatif) : la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est I3: Bistrița, Tismana, Șușița, Runcu I5: Șușița, Jilț et Raznic I7 : Jiu de l'Est, Bistrița et Tismana I13 : Runcu, Tismana, Bistrița
C27	3-14 décembre 2002	640	Une crue du N <sub>1</sub> et N <sub>2</sub> surtout. C'est la Motru, la Raznic, la Tismana et la Șușița qui contribuent. Un peu de la Jilț (lignite) et de la Jiu de l'Ouest (houille), mais la crue a été assez faible comme débit	I1 (relatif) : La Motru et la Jiu de l'Ouest I3 : Tismana, Șușița, Runcu, Bistrița I5: Jilț, Motru et Raznic I7: Raznic, Tismana, Șușița, Runcu, Bistrița I13: Runcu, Tismana et Șușița

Enfin, quelques observations supplémentaires doivent être faites. En ce qui concerne l'indice 5, sur le volume de la crue par rapport à la moyenne multiannuelle, là où la même station apparaît plusieurs fois signifie que la crue a été importante mais avec un pourcentage petit et qu'il y a de faibles différences entre les crues du point de vue de l'importance. L'indice 13 homogénéise les petits bassins versant et fait sembler qu'ils sont dominants. Pour chaque indice, nous avons créé des tableaux de classification arbres de décision classifiant les contributions des stations hydrométriques et sous-bassins/ rivières analysés.

Nous présentons comme titre d'exemple des indices 1 et 5 qui sont assez différents (*Annexe*), où nous observons la conséquence d'une faute de cette méthodologie (au moins la façon de se rapporter déjà la station de référence différente à chaque niveau (N1, N2, N3). La dominance du rouge (grande contribution en crue) au droit des sous-bassins des niveaux supérieurs est donnée par le fait que le calcul se fait par rapport aux valeurs d'une station de référence aval différente pour chacun des 3 niveaux. Il semblerait que les sous-bassins amont sont plus contributifs, mais il s'agit en fait d'une fausse évidence de classification des contributions. Dans des versions futures des indices, nous essayerons d'utiliser une seule station de référence aval (i.e. s.h. de Podari), par rapport de laquelle estimer la contribution relative de chaque sous-bassin selon l'indice.

## Chapitre 8.

# Analyse des dépôts sédimentaires. Échantillonnage et méthodes

<b>8.1. Quels sont les types de sédiments et d'où prenons-nous les échantillons ?</b> .....	394
8.1.1. L'échantillonnage sédimentaire des lits "en amont" .....	395
8.1.1.1. Objectifs et stratégie .....	395
8.1.1.2. Protocole d'échantillonnage et la répartition spatiales des points de prélèvement .....	397
8.1.2. L'échantillonnage sédimentaire des berges "en aval" .....	400
8.1.2.1. L'intérêt de l'étude des dépôts sédimentaires sur les berges .....	400
8.1.2.2. Description du site pour l'échantillonnage des berges .....	401
8.1.2.3. La morphologie locale .....	403
8.1.2.4. Le choix de la tranchée : avantages et inconvénients .....	406
8.1.2.5. Quelle stratégie d'échantillonnage ? .....	408
8.1.3. Les échantillons de charbon brut des zones source .....	410
<b>8.2. Différentes méthodes de laboratoire pour l'analyse des échantillons</b> .....	411
8.2.1. La granulométrie .....	412
8.2.1.1. Granulométrie par tamisage .....	413
8.2.1.1.1. Principe de mesure .....	413
8.2.1.1.2. Avantages et inconvénients .....	414
8.2.1.2. La granulométrie laser .....	416
8.2.1.2.1. Principe de mesure .....	416
8.2.1.2.2. Avantages et inconvénients .....	418
8.2.2. La colorimétrie .....	419
8.2.2.1. Etat de l'art .....	419
8.2.2.2. Préparation des échantillons .....	419
8.2.2.3. Méthodes de mesure .....	420



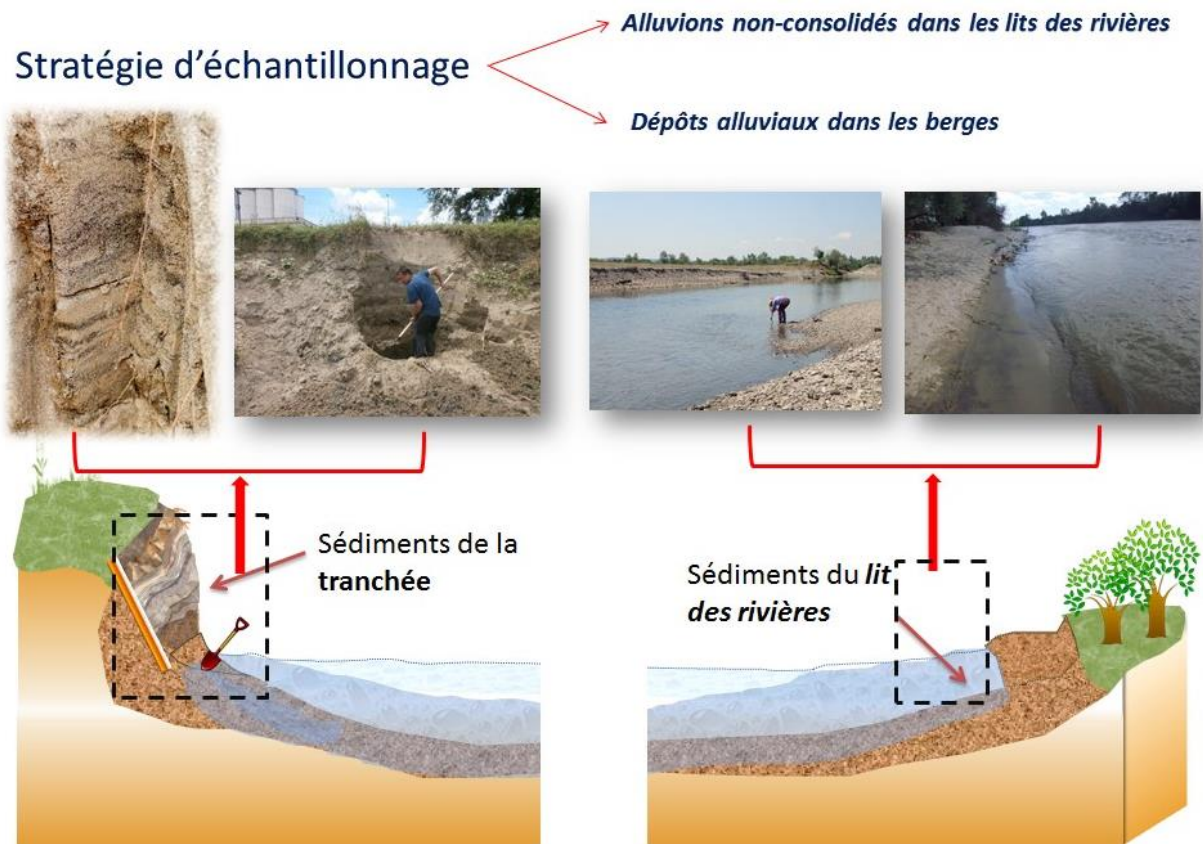
8.2.3. Analyse d'image.....	422
8.2.4. Application de la pétrologie organique.....	427
8.2.4.1. État de l'art et principe de la méthode.....	427
8.2.4.2. Protocole et techniques de mesure.....	428
8.2.4.3. Avantages et inconvénients.....	431
8.2.5. Méthodes géochimiques.....	431
8.2.5.1. Le carbone total.....	431
8.2.5.1.1. Protocole de mesure.....	432
8.2.5.1.2. Avantages et inconvénients.....	434
8.2.5.2. Spéciation houille-lignite.....	434
8.2.5.2.1. Principe de mesure.....	434
8.2.5.2.2. Avantages et inconvénients.....	436
8.2.5.3. Métaux lourds et lanthanides.....	436
8.2.5.3.1. Historique de l'approche.....	436
8.2.5.3.2. Protocole de travail.....	439
8.2.5.3.3. Principe de la méthode d'analyse par spectroscopie à fluorescence X.....	439
8.2.5.3.4. Avantages et inconvénients.....	441

Ce chapitre décrit d'abord les sites et le protocole d'échantillonnage des sédiments fins analysés dans le cadre de la démarche de suivi des sources et dépôts de sédiments dans le bassin de la rivière Jiu. Une fois précisée la technique d'échantillonnage, les analyses des échantillons seront faites par plusieurs méthodes de laboratoire destinées à mettre en évidence leur composition géochimique et des sections dédiées à chaque procédé y seront consacrées. Tout d'abord, nous présenterons les sites de travail et les critères pour le choix des sites et des modalités d'échantillonnage, ensuite nous présenterons les différentes méthodes mises en œuvre au laboratoire pour analyser ces sédiments.

Les résultats des analyses elles-mêmes seront présentées au chapitre §10 suivant.

### 8.1 *Quels sont les types de sédiments et d'où prenons-nous les échantillons?*

Les sections de ce sous-chapitre correspondent aux trois catégories principales d'échantillons. Pour ceci nous présenterons les sites à échantillonner et nous expliquerons les critères qui sous-tendent leur choix relatif aux objectifs fixés (*Figure VIII.1*):



**Figure VIII.1.** Schéma des deux catégories de sites d'échantillonnage des sédiments : dans les berges et dans les lits des rivières

- a) Points d'échantillonnage en amont, situés dans les lits des rivières, aux confluences des rivières, à la base des versants à forte érosion et connectivité hydro-sédimentaire avec la rivière Jiu, en proximité des zones d'extraction du charbon. Ces sites ont été appelés de manière générique des "*sites en amont*"; ces échantillons portent sur des alluvions non-consolidés des lits des rivières ;
- b) Points d'échantillonnage en aval du bassin de la rivière Jiu, constitués d'une succession de dépôts sur les berges de plusieurs périodes, représentant les effets du transfert de matières sédimentaires des sites en amont. Ces points d'échantillonnage ont été appelés "*sites en aval*".
- c) Matériaux natifs : nous analyserons aussi des échantillons de charbon directement prélevés sur les sites d'extraction.

La mise en place du protocole d'échantillonnage, ainsi que les étapes de traitement des échantillons, seront également décrites en relation avec le type d'échantillon prélevé. Dans le **Tableau VIII.1** nous présentons les campagnes d'échantillonnage, leur nombre et le type d'échantillons prélevés.

**Tableau VIII.1.** Sommaire des campagnes d'échantillonnage

No	Date/ Période	Nombre total d'échantillons	Type d'échantillons					Charbon brut
			Alluvions					
			Du lit des rivières		De la berge			
			La Jiu	Les affluents	Tranchée 1	Tranchée 2		
1	24 – 26 février 2016	30	9	21	11	-	-	
2	22 mai 2016	4	2	2	-	-	-	
3	5-6 aout 2016	19	10	9	-	-	1	
4	9-15 juin 2017	40	7	33	-	11	7	
5	15-17 juillet 2018	12	-	12	-	-	-	
6	8-10 aout 2018	3	-	3	-	-	-	
7	1 septembre 2019	2	1	1	-	3	-	
8	Echantillons procurés par des personnes connues, autres que l'auteur de la thèse (date pas communiquée, durant l'année 2017)	-	-	-	-	-	2	

## 8.1.1. L'échantillonnage sédimentaire des lits "en amont"

### 8.1.1.1. Objectifs et stratégie

Afin de connaître les caractéristiques physico-chimiques des sédiments fins dans les zones de source, de transport et de stockage intermédiaire, qui permettent d'identifier l'origine des dépôts sédimentaires du secteur inférieur du bassin, une Campagne d'échantillonnage dans le bassin amont (moyen et supérieur) a été effectuée.

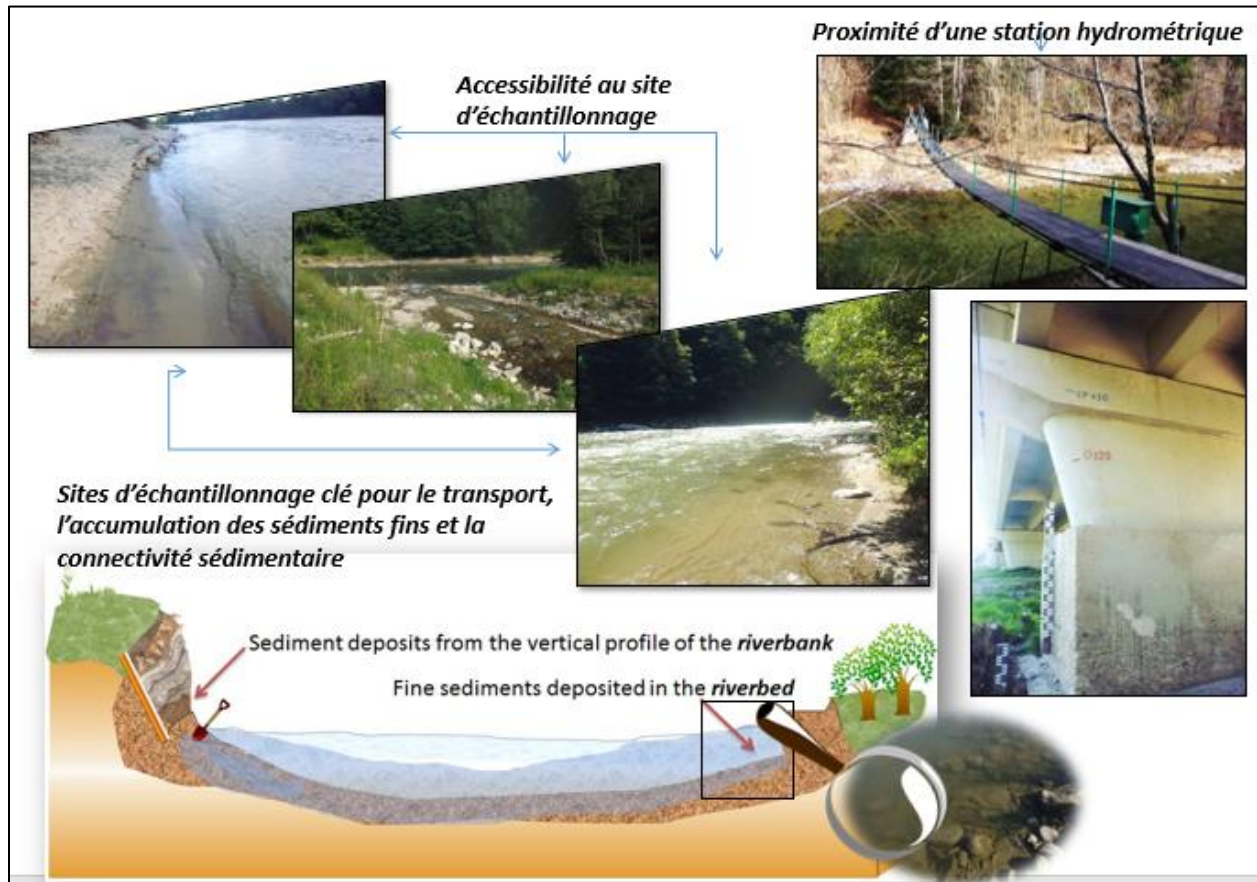
Comme critère majeur dans la sélection des points de prélèvement, il fallait avant tout prendre en compte la grande taille du bassin et l'impossibilité de couvrir toute sa surface pour prendre un nombre élevé d'échantillons. Dans ces conditions, le choix des points d'échantillonnage était d'autant plus important que les sédiments prélevés devaient être représentatifs de vastes zones source de différentes caractéristiques, car il n'était pas possible de suivre une grille régulière avec une densité de points d'intérêt fixe.

Nous avons ainsi premièrement suivi une logique de la représentativité et deuxièmement de la proximité des points d'intérêt hydrologique, auxquelles on s'ajoute l'accessibilité aux points de prélèvement, critères définis comme suit :

(i) *Représentativité* – Pour qu'un point d'échantillonnage soit représentatif, il doit être associé aux zones d'origine des sédiments qui y sont déposées. Ainsi, les zones de confluence, les dépôts de lit en aval des sources potentielles de sédiments dans un bassin versant, les réservoirs dans lesquels les sédiments provenant de sources variées, même de sous-bassins différents, se déposent, ou les points situés en aval des exploitations de charbon ont été priorisés. La représentativité est liée non seulement aux conditions de formation des flux hydro-sédimentaires en amont, mais également aux conditions hydrodynamiques sur place. À titre d'exemple, un tronçon d'une rivière affecté par des processus d'enfoncement du lit et d'érosion des berges ne peut pas être considéré comme représentatif, même s'il se trouve en aval d'une zone très impliquée dans la production d'alluvions.

(ii) *Proximité des stations hydrométriques* – L'un des objectifs initiaux de la recherche a été de mettre le transport des sédiments fins en relation avec les flux liquides. Ainsi, un autre critère important a consisté à choisir des points de prélèvement le plus près possible des stations hydrométriques, voire même le même endroit. De cette manière, il était possible de créer un lien de causalité entre l'écoulement liquide et les flux de matière sédimentaire. Il convient de garder à l'esprit que la notion de proximité des sédiments (par exemple, l'échantillonnage de dépôts alluviaux dans un secteur fluvial immédiatement en aval d'un glissement de terrain qui alimente les sédiments) ne doit pas être confondue avec la proximité d'une station hydrométrique qui peut être située à des dizaines de kilomètres en aval des principales zones sources de sédiments d'un bassin versant.

(iii) *Accessibilité* – Bien que cela ne semble pas essentiel, ce critère a joué toutefois un rôle important dans la sélection des sites d'échantillonnage, car il s'agissait en effet d'un bassin hydrographique de grande taille dont la connaissance en détail *a priori* est très difficile. Après une première Campagne sur le terrain, plusieurs points d'échantillonnage ont été identifiés, de nombreux autres ont été établis à la suite de l'étude de plusieurs types de cartes et d'informations au bureau (carte hydrographique, carte topographique, imagerie satellite, statistiques hydro-sédimentaires). Cependant, sur le terrain, certains endroits étaient difficilement accessibles. Dans la plupart des situations, les limites ont été liées à la forte pente des berges, aux secteurs endigués avec des berges en béton, à la végétation extrêmement dense et difficile à franchir, ou même au régime de propriété privée qui rendait certains secteurs de rivière inaccessibles sur le terrain. Le diagramme de la **Figure VIII.2** illustre les trois critères d'échantillonnage en mettant en évidence des situations concrètes sur le terrain.



**Figure VIII.2.** Concept général de l'échantillonnage des sédiments des lits des rivières



Les sites d'échantillonnage sont donc considérés comme étant représentatifs des processus hydrauliques et de sédimentation se produisant dans les différents secteurs du bassin de la rivière Jiu. Les sites sont morphologiquement stables et les particularités locales en termes de flux de sédiment et d'eau ou de stockage (puits locaux ou trappes de sédiments) ont été afin d'éviter des anomalies qui fausseraient soit la composition moyenne des sédiments, soit la géomorphologie du lit.

#### ***8.1.1.2. Protocole d'échantillonnage et la répartition spatiales des points de prélèvement***

L'objectif était de capturer les caractéristiques des rivières, en termes de sources alluviales, de contaminants éventuels et d'éléments traces dans les sédiments, de tri granulométrique lié à l'évolution du profil longitudinal, de la capacité de transport d'un cours d'eau donné. La connaissance de ces matériaux s'est avérée nécessaire dans notre étude à diverses fins.

Tout d'abord, la taille et la gradation du matériau du lit peuvent affecter la source, le transport et le devenir des oligo-éléments trouvés dans les sédiments alluviaux plus en aval; ils peuvent ensuite être associés à l'évolution morphologique de la rivière afin de pouvoir être utilisés comme prédicteurs d'un certain type d'écoulement et des changements de la capacité de transport des sédiments. Deuxièmement, étant donné que l'échantillonnage a été réalisé en été, lors du régime de faible à moyen débit, les sédiments reposant sur le lit ne sont pas nécessairement ce que les rivières pourraient apporter pendant les hautes. Même dans ce cas, les sédiments de lit sont toujours utiles pour décrire l'état général de la rivière et des sédiments fins qu'elle transporte (et dépose). Troisième et dernier point, en l'absence d'une cartographie très détaillée et d'un échantillonnage de toute une zone de sédiments sources clés à utiliser comme prédicteurs de ce que nous pourrions attendre en aval, les points de prélèvement intermédiaires situés le long des rivières ont été vus à la fois comme sources et zones de stockage transitoires pour les sédiments fins. Les trois arguments prouvent l'utilité de l'échantillonnage des sédiments déposés temporairement sur les lits des rivières.

Alors que le matériau sédimentaire du lit est souvent caractérisé par la taille du grain, d'autres caractéristiques peuvent également être utiles à connaître. Ces caractéristiques particulières incluent la forme, la densité, la lithologie et la minéralogie du dépôt alluvial. En outre, la profondeur et la vitesse de l'eau, ainsi que la taille maximale des particules à être transportés jouent également un rôle important dans la détermination de la variation des caractéristiques des sédiments avec l'emplacement et, au final, dans le choix des points d'échantillonnage.

La stratégie utilisée pour choisir les endroits et effectuer l'échantillonnage repose sur l'emploi des lots d'échantillonnage, à savoir des sections/ tronçons de rivière ayant des caractéristiques hydrauliques présumées uniformes. Pour des raisons pratiques, nous avons récolté uniquement des *échantillons élémentaires* d'environ 250 – 300 g (en état humide). Conformément à la procédure de CWEA (2014), les échantillons ont été prélevés en une seule fois et à un point du lot (par ex. dans le tronçon aval d'un secteur de rivière caractérisé par processus géomorphologiques ou des activités industrielles qui pourraient augmenter la concentration des matières en suspension). Afin de connaître les caractéristiques générales des alluvions du bassin de la rivière Jiu, il n'était pas nécessaire de collecter davantage d'échantillons du même endroit.

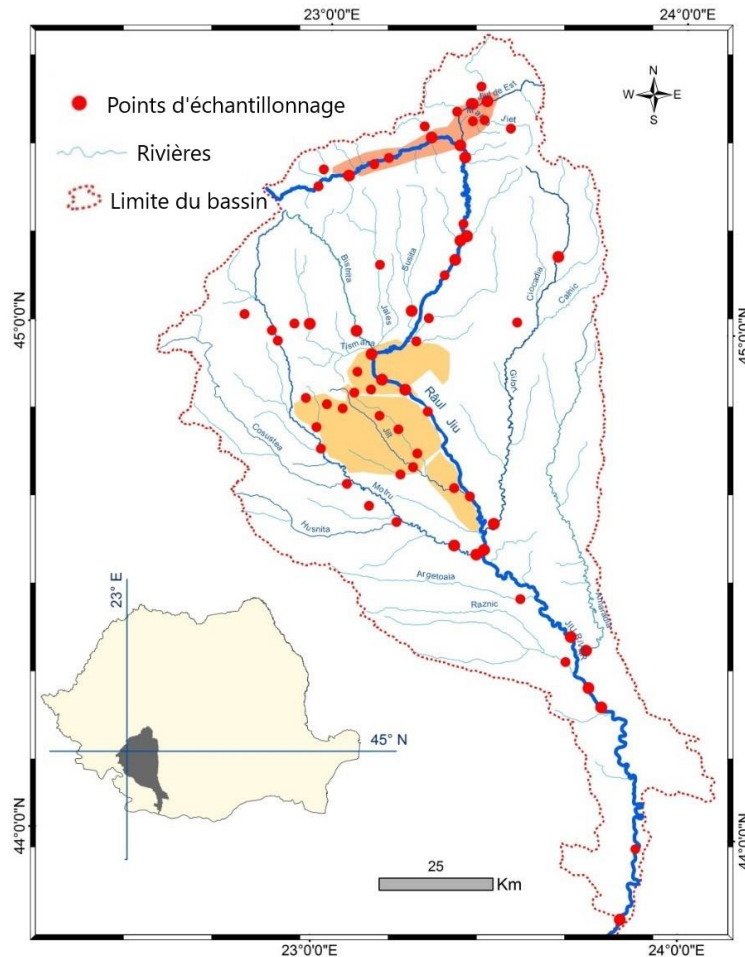
Les tronçons d'analyse sont aussi des cours d'eau à lit de sable et d'argile que des cours d'eau à lit grossier. La procédure adoptée a été l'échantillonnage à la main (*Figure VIII.3*).



**Figure VIII.3.** Échantillonnage des sédiments des lits des rivières (*clichés pris durant les campagnes d'échantillonnage*)

Avant chaque échantillonnage, les cailloux, branches, racines et autres matériaux grossiers, flottants ou fixés du substrat alluvial, ont été retirés pour permettre une capture correcte des sédiments fins. Lors de chaque échantillonnage, le géoréférencement a été effectué avec le suivi GPS et des photos ont été prises pour d'éventuelles observations ultérieures. Chaque échantillon de sédiment a été stocké dans des sacs en plastique et étiqueté en double et son nom transmis à l'enregistreur d'échantillons.

Au total, environ 80 échantillons ont été collectés durant les mois d'été de 2016 et 2017, étant utilisés plus tard en nombre différent selon les manipulations de laboratoire réalisées. Leur composition minéralogique correspond à celle du bassin de drainage amont de chaque point de prélèvement. La granulométrie de ces échantillons ne peut pas être exploitée parce qu'elle dépend principalement des conditions locales. Par contre, nous allons voir qu'ils ont été analysés par différentes autres méthodes de laboratoire qu'on détaillera dans les sous-chapitres à venir. Sur la base des coordonnées prises avec le GPS pour chaque point d'échantillonnage, nous avons spatialisé leur distribution (*Figure VIII.4*).



**Figure VIII.4.** Carte des points d'échantillonnage des sédiments fins du lit des rivières

La répartition des points de prélèvement des sédiments portant différentes signatures en amont est toujours plus concentrée dans les zones de confluence des rivières, en aval des zones marquées par les activités anthropogéniques génératrices de particules, ou dans les zones de faible pente le long des rivières principales, où les processus d'accumulation prédominent.

Pour que chaque échantillon soit représentatif, les points d'échantillonnage sont plus nombreux le long de la Jiu et de ses principaux affluents, ainsi que dans le bassin minier de Motru - Rovinari, chevauchant principalement le bassin de la rivière Jilț ; la densité des échantillons est plus en dehors de ces secteurs de haute dynamique hydro-sédimentaire.

## 8.1.2. L'échantillonnage sédimentaire des berges "en aval"

### 8.1.2.1. L'intérêt de l'étude des dépôts sédimentaires sur les berges

On a déjà expliqué au chapitre §6 le principe de « la tranchée » comme archive sédimentaire des sédiments transportés en crue. On reprend ici les conditions (*Figure VIII.5*):

- Le tronçon de la rivière devait être suffisamment en aval pour pouvoir capter toutes les sources possibles de sédiments des affluents et des zones de transfert de la matière érodée des versants;



**Figure VIII.5.** Lieux d'échantillonnage privilégiés des berges d'accumulation (clichés : Belleudy, 2017)

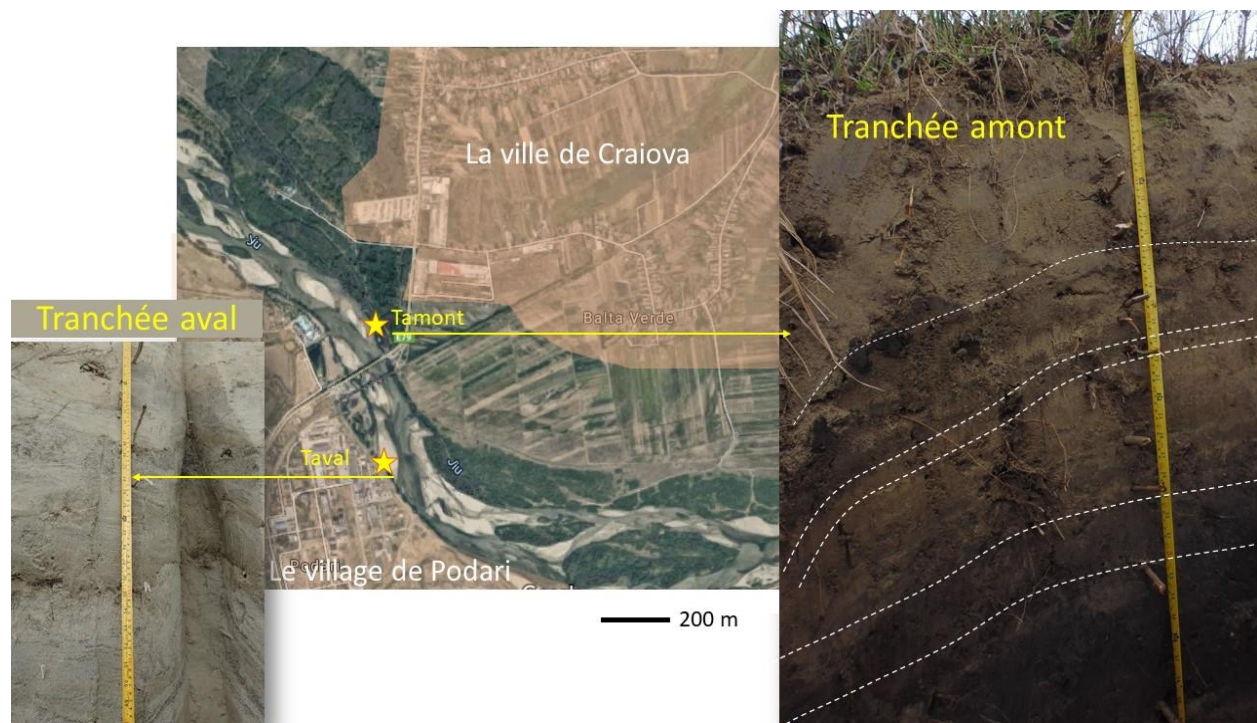
- La berge d'accumulation devait être stable du point de vue géomorphologique, en ce qui concerne effets d'érosion exercées par la rivière ;
- Le tronçon ne devait pas être rectifié ni canalisé, car dans ces situations les processus d'accumulation sont limités.



- Le tronçon devait être rectiligne et pas méandré, puisque les accumulations de berge le long des méandres ne sont pas aussi idéales car les vitesses sont très variables et diminuent vers la rive intérieure.
- Le dépôt alluvial devrait être suffisamment épais, c'est-à-dire avoir été construit lors des plusieurs événements de crue, auxquels correspondent par conséquent plusieurs couches de sédiments

### 8.1.2.2. Description du site pour l'échantillonnage des berges

Dans un premier temps, un site a été sélectionné en rive gauche de la rivière Jiu, environ 200 m en amont de la station hydrométrique de Podari (**Figure VIII.6**), 60 km en amont de l'embouchure avec le Danube. Nous avons creusé une tranchée où nous avons identifié 11 couches de sédiments qui semblaient être déposées lors des 11 les plus fortes inondations des dernières décennies. Cette tranchée a été nommée « T<sub>amont</sub> ».



**Figure VIII.6.** Localisation du site de la berge côté gauche (T<sub>amont</sub>) et côté droit (T<sub>aval</sub>) de la rivière Jiu, en amont et en aval de la station hydrométrique de Podari. Zoom sur les couches sédimentaires

Différentes couches de sédiment étaient visibles et ce premier essai a confirmé la pertinence de la méthode. Il présentait cependant plusieurs défauts. En particulier ce site amont était situé sur une berge boisée susceptible de perturber les écoulements et en conséquence la formation des différentes couches au moment des inondations de cette berge boisée a été certainement. Nous avons donc cherché un deuxième site toujours à proximité de la station de jaugeage de Podari, où la berge est mieux exposée à la rivière et la



formation des couches est certainement plus homogène et ne dépend pas d'obstacles locaux (une souche d'arbre par exemple).

Le site choisi se trouve cette fois en rive droite, environ 300 m en aval de la station hydrométrique de Podari. La tranchée creusée à cet endroit a été appelé « T<sub>aval</sub> ». La berge est recouverte d'une végétation herbacée, elle est séparée par la rivière pendant les petites eaux par un banc de sable. La facilité d'accès durant toute la période de l'année, surtout l'été en période de développement maximal de la végétation, a été un fort atout pour le choix de ce site. De plus, il se trouve dans une partie stable du secteur inférieur de la rivière Jiu, où les processus d'accumulation dominant.

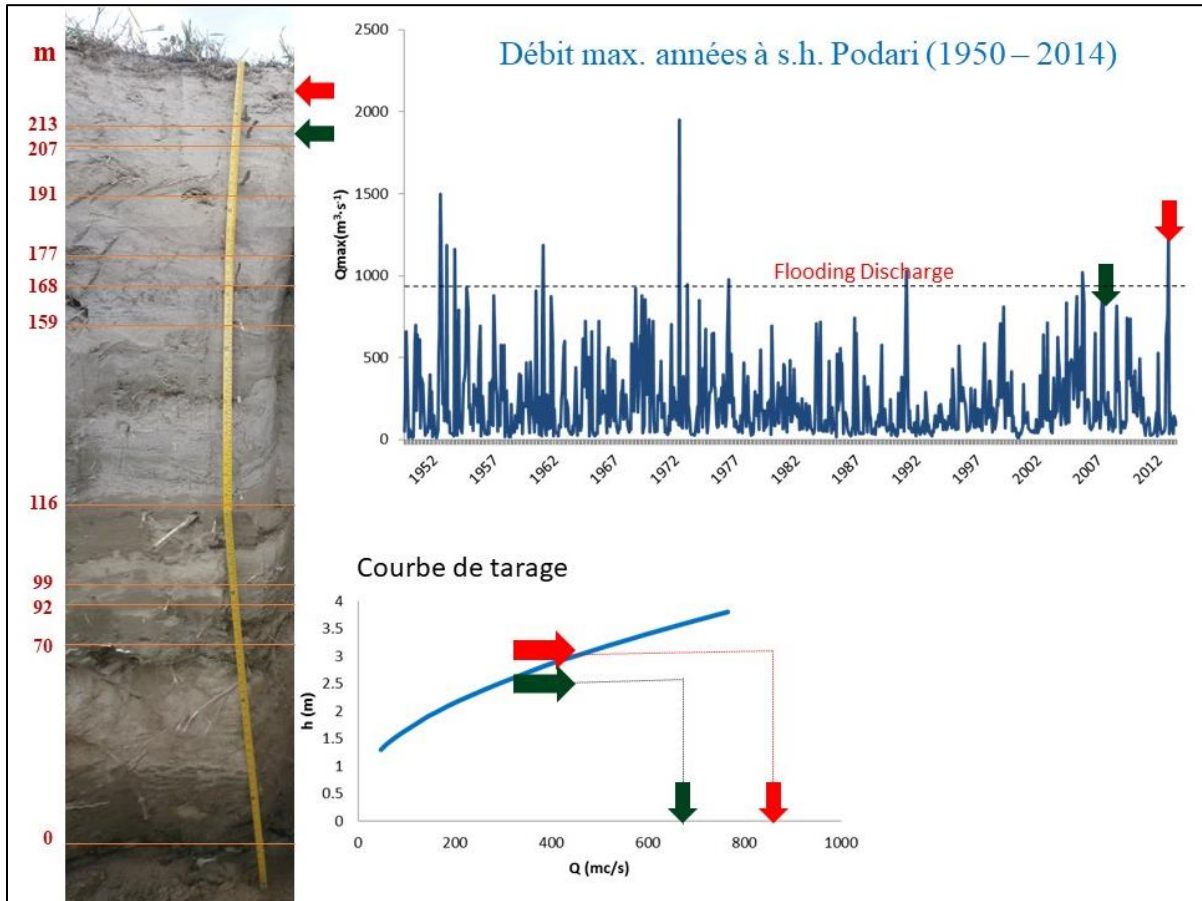
L'hypothèse de l'âge récent des sédiments déposés sur la rive est confortée par l'existence de la digue de protection contre les inondations située environ 20 – 25 m de la rive.

***Nous prenons l'occasion de cette évocation pour souligner les enjeux de ce travail sur le transport solide dans le bassin de la Jiu et les enjeux en termes de risque d'inondation et d'aménagement de la rivière***

*La digue appelée "Podari Abator" a été construite après la crue historique de 3 – 30 octobre 1972, dont le débit de pointe de  $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a atteint la hauteur à l'échelle limnimétrique de 537 cm, dépassant de 77 cm la cote de danger actuelle établie pour la station Podari par les institutions responsables de la gestion des bassins hydrographiques; nous allons souvent la mentionner pour nous référencer sur la relation niveau – débit. En fait, cette inondation a été le plus grand événement hydrologique jamais enregistré sur la rivière Jiu, dont le débit de pointe mentionné (qui s'est maintenu pendant 7h) correspond à une période de retour de 134 ans.*

*La crue de 1972 a été généralisée et s'est étendue à l'échelle de tout le bassin de la Jiu, les probabilités de dépassement des débits maximaux enregistrés dans la plupart des stations hydrométriques du bassin ayant des valeurs de 3 à 12%. Le temps de croissance de la crue a été de 4 à 5 jours sur les petites rivières et de 7 à 8 jours sur les principaux cours d'eau (Jiu, ses affluents Motru et Gilort). L'importance de cette inondation dans la définition des stratégies d'aménagement des territoires exposés a été signalée. Nous la voyons bien mise en évidence dans les plans de gestion du bassin versant de la Jiu [PPPDEI - Jiu, 2013 et 2017]. Les dommages causés par cette inondation ont été estimés à environ 48 sites industriels dans le secteur entre Craiova et la confluence avec le Danube, ainsi que des terres arables inondées (31 964 ha) et plus de 80 km de routes. Dans ces conditions, il a été crucial de construire une digue pour protéger les objectifs socio-économiques sur toute la longueur de la rivière Jiu entre Filiași et la section en aval de la ville de Craiova. La portion de la digue au droit de la tranchée a une longueur de 1,65 km et a une structure de terre drainée avec une inclinaison extérieure non protégée, formant un dépôt sédimentaire de berge.*

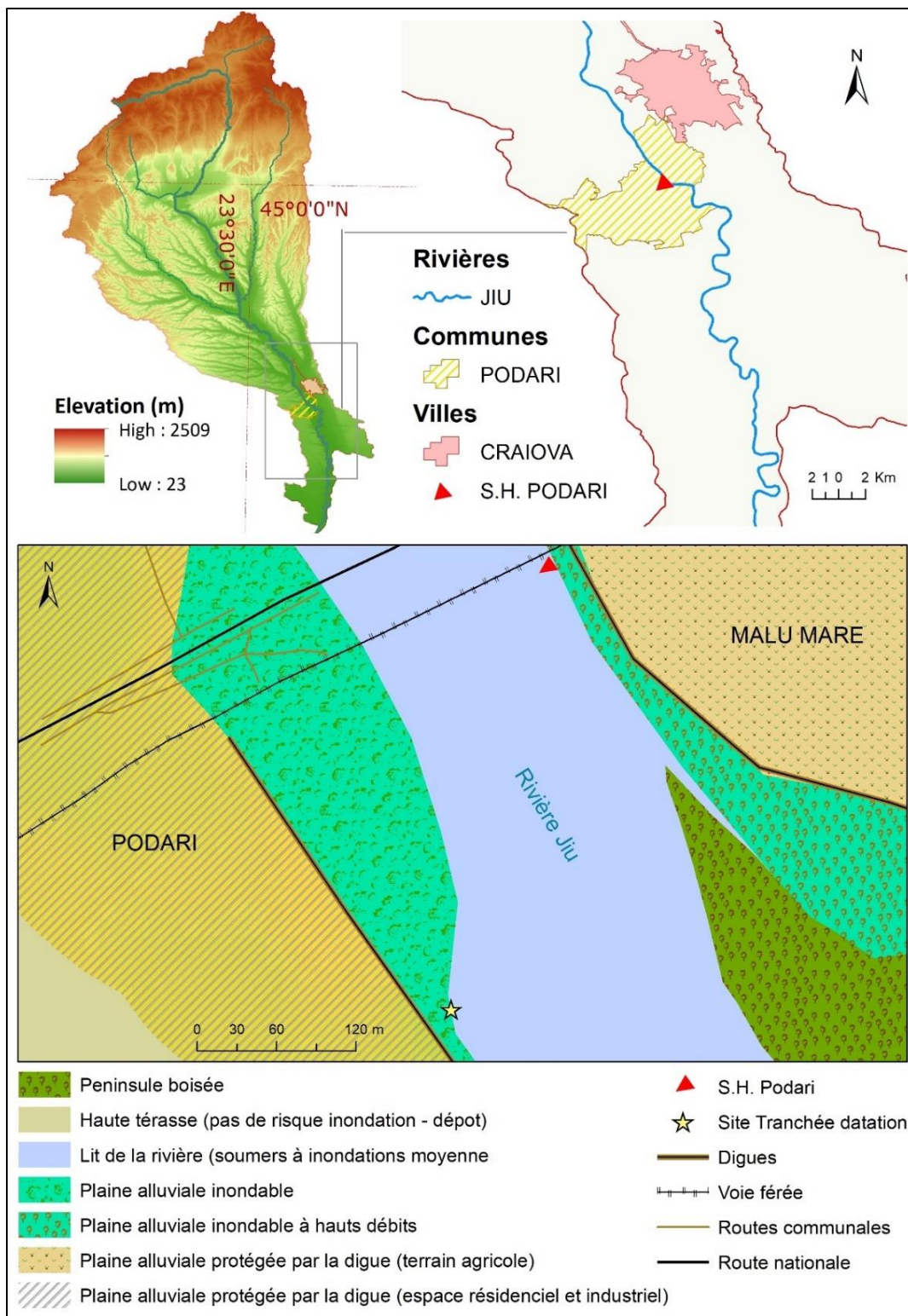
Nous rappelons dans cette description du site les hypothèses retenues aux chapitres §6.3.2. - §6.3.4., selon lesquelles : *i*) chaque couche a été déposée par une crue différente (**Figure VIII.7**); *ii*) après chaque dépôt, il y avait des processus de sédimentation et de consolidation de la nouvelle couche et pas ou peu d'érosion qui aurait pu détruire la nouvelle couche; et *iii*) le début de la formation de la berge naturelle à l'intérieur de la digue est récente (certainement postérieure à la construction de la digue), du moins pour les couches supérieures.



**Figure VIII.7.** Schéma théorique – hypothétique de la relation crues – dépôts des alluvions

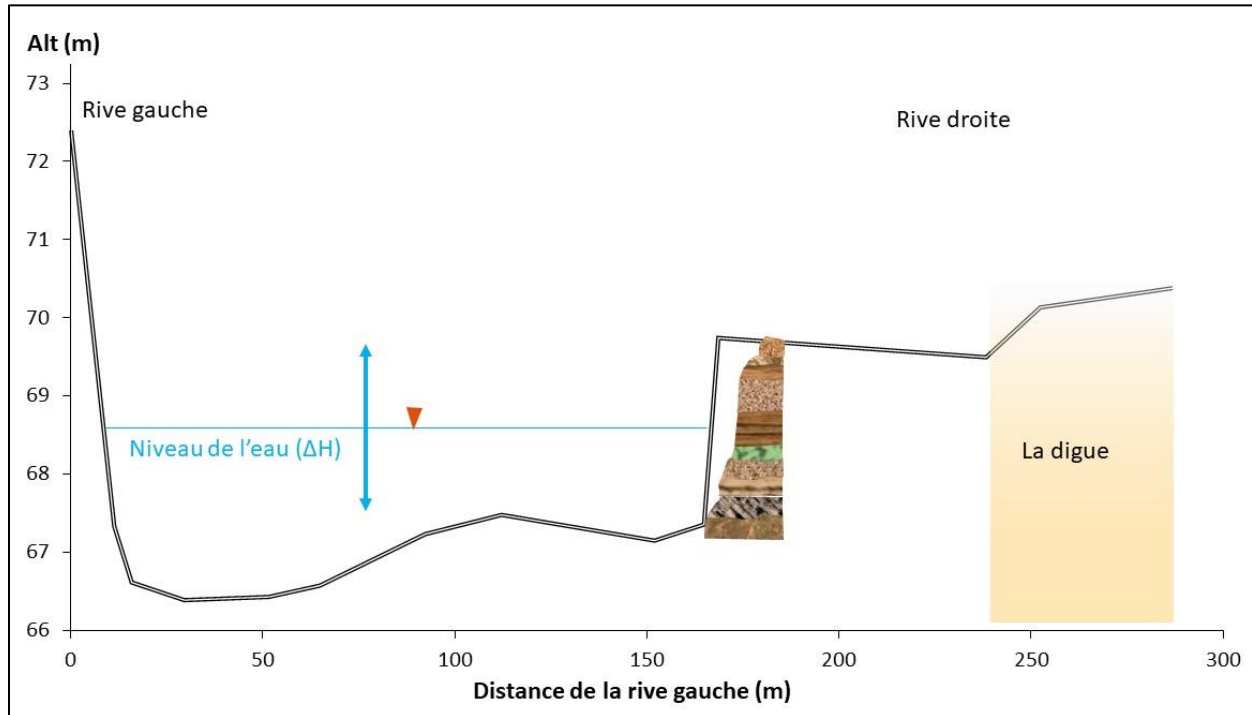
### 8.1.2.3. La morphologie locale

Sur le tronçon que nous avons choisi, les digues ont été construites sur les deux côtés de la rivière Jiu pour protéger les villages et les quartiers de banlieue de Craiova (Branîște et Balta Verde à gauche, respectivement Bucovăț et Podari à droite). Si jusqu'à Podari, le lit de la rivière Jiu est resté relativement étroit, avec un développement très limité après la construction des digues, dans la section de Podari, l'activité alluviale a repris par l'apparition de sinuosités, d'îles, de plages de sable influencés par la montée permanente et naturelle du rivage entre la digue et la rivière (**Figure VIII.8**).



**Figure VIII.8.** La géomorphologie locale à Podari

Si nous allons plus en détail, nous remarquons que la berge d'accumulation s'est développée sur une largeur importante entre la digue et la rivière (entre 20 et 25 m). Vu du profil, le rivage a une forme légèrement convexe, reposant sur une plage sableuse qui reste submergée lors d'inondations (**Figure VIII.9**).



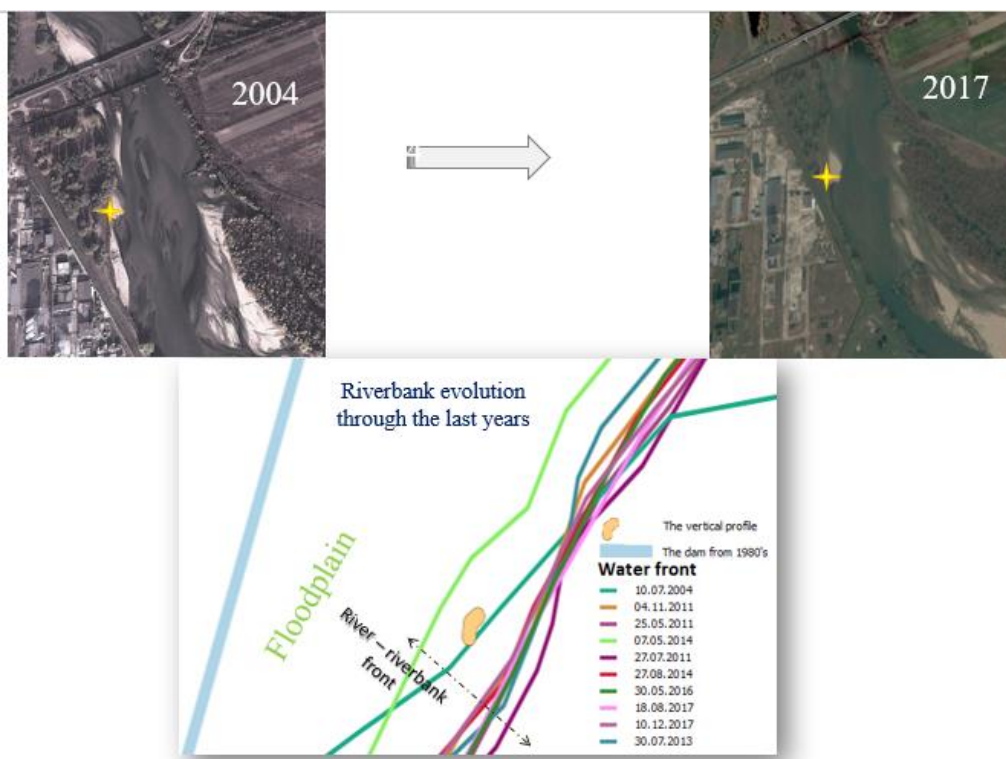
**Figure VIII.9.** La berge en coupe transversale. Modèle numérique utilisé - résolution ALOS Palsar de 12,5 m (2012)

De manière générale, par le rôle de zone tampon entre le lit mineur des rivières et la plaine inondable, les berges répondent à la pression hydromorphologique par divers types d'ajustements. Ces ajustements géomorphologiques se caractérisent notamment par l'enfoncement du lit de rivière, par l'accumulation des dépôts fluviaux et l'agrégation ou bien par le creusement des berges. Dans le cas de la berge à Podari, son évolution vue à travers l'imagerie satellitaire de 2004 à 2018, révèle des changements dans le lit de la rivière (alternance de l'extension et de submersion des îles de sable), mais pas d'érosion/retrait de la berge. Nous avons en plus la chance de voir la berge submergée sur l'image de 2014, comme c'est exposé au chapitre §7.3.2., où nous avons constaté que l'évolution positive du dépôt en bordure de rivière n'était possible que lors des inondations avec le débit le plus élevé (**Figure VIII.10**).

Actuellement, la berge a une hauteur de 2,5 m et communique avec la rivière soit directement lors des hautes eaux, soit à travers la plage sableuse au pied de sa couche inférieure.

Les sous-chapitres suivants traitent les différentes étapes du travail de terrain concernant l'échantillonnage des couches sédimentaires formant la berge.





**Figure VIII.10.** L'évolution morphologique du site entre 2004 et 2018. Le cliché de mai 2014, lors de l'une des épisodes les plus fortes en crue, montre clairement le lien entre l'agrégation des berges et les inondations (images Google Earth)

#### 8.1.2.4. Le choix de la tranchée : avantages et inconvénients

Comme méthode d'exploration du milieu de dépôt de berge, nous avons choisi la tranchée et nous avons creusé deux tranchées, comme on l'a précisé dans le chapitre §8.1.2.2. Parmi les deux, celle le plus en aval a été soumise à l'analyse complète concernant la composition des couches.

Une autre façon d'analyser d'une série verticale de dépôts de berge aurait pu être la carotte. Les **avantages (A)** et les **inconvénients (I)** de chacune des options sont mentionnés ci-dessous :

- A<sub>tranchée</sub> :
  - Nous voyons concrètement les couches déposées horizontalement et nous observons si elles sont à peu près homogènes ;
  - L'état hydrique et les caractéristiques du dépôt (hauteur et épaisseur des couches) peuvent être évalués et servent au découpage des couches formant la tranchée ;
  - Nous gagnons des connaissances *a priori* sur la succession des couches déposées ;



- La succession des couches déposées reflète l'échelle de la crue, ce qui est en accord avec les objectifs de cette approche.

•  $I_{\text{tranchée}}$  :

- L'échantillonnage est fait avant d'analyser au laboratoire les sédiments, ce qui peut induire des erreurs ;

- La délimitation des couches peut être subjective ;

- Il est difficile de réaliser un prélèvement moyen représentatif de la couche ;

- Il n'est pas facile d'avoir une exploration verticale de la tranchée étroitement creusée le plus souvent en contact avec la rivière ;

- L'échantillonnage sur place demande un bon planning des analyses de laboratoire, pour prélever une quantité de sédiment suffisante.

•  $A_{\text{carotte}}$  :

- Par le carottage, on préserve le prélèvement et la succession des couches, ce qui permet de reconstituer facilement le milieu de dépôt ;

- L'analyse des carottes a posteriori dans le laboratoire est plus précise en particulier en ce qui concerne l'épaisseur des couches et granulométrie, car plusieurs échantillons peuvent être manipulés de la même couche sans avoir besoin de revenir sur le terrain pour une nouvelle Campagne de prélèvements ;

- L'échantillonnage peut être affiné dans le laboratoire à partir de la carotte entièrement à la disposition aux chercheurs.

•  $I_{\text{carotte}}$  :

- Nous ne pouvons pas faire des observations sur le terrain en ce qui concerne l'aspect du dépôt (épaisseur, humidité, couleur)

- La réalisation d'une carotte est plus compliquée du point de vue technique, par rapport à une tranchée qui peut être effectuée même avec des instruments d'utilisation commune (pelle, couteau)

- L'analyse d'une carotte est beaucoup plus coûteuse par rapport à celle d'une tranchée.

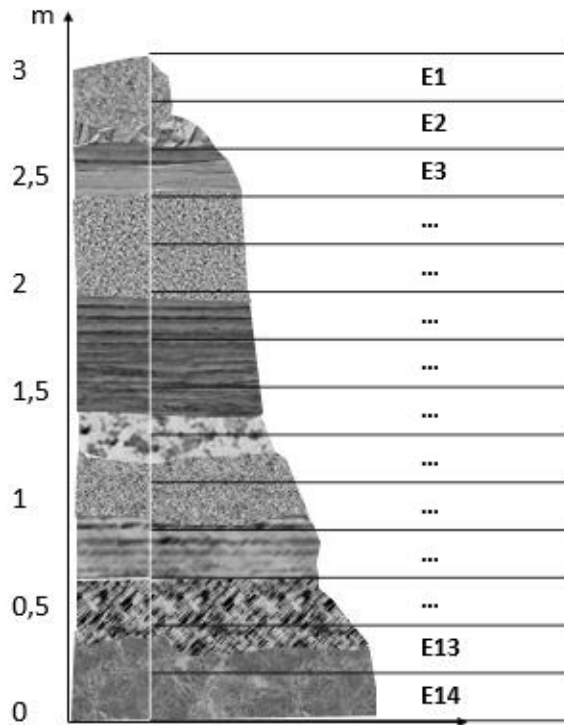
Bien que la distinction et le découpage des couches déposées auraient pu être mieux surveillés en laboratoire en utilisant la carotte, pour des raisons scientifiques, pratiques et financières, la tranchée a été préférée.

#### **8.1.2.5. *Quelle stratégie d'échantillonnage ?***

Une fois que le dépôt de berge a été rafraîchi et nettoyé en éliminant les matériaux non consolidés sur sa façade vers la rivière, l'étape suivante a été de prélever les échantillons des couches sédimentaires

composant la berge. De principe, il existe deux façons d'exécuter l'échantillonnage : systématique et visuellement.

(i) Dans l'approche systématique on échantillonne tous les «*n*» cm (voir Jegou, 2002), sans tenir compte des caractéristiques des couches de sédiments. Tout en étant le moins subjectif possible, en veillant à ce qu'aucune couche principale ou intercalaire n'ait été oubliée, elle peut poser de sérieux problèmes lors de l'assemblage de l'information et de la reconstitution des couches réelles. Dans la nature, les épaisseurs et les hauteurs des couches ne sont pas régulières (*Figure VIII.11*).



**Figure VIII.11.** Schéma d'un échantillonnage systématique fictif

Il est donc difficile de passer d'une géométrie systématique à la configuration naturelle d'une couche sans disposer d'une information complémentaire comme par exemple la végétation développée entre chaque couche (Jegou, 2002). Ainsi, alors que l'inconvénient est de savoir comment choisir l'intervalle d'échantillonnage et comment grouper les couches également épaisses dans la couche réelle correspondant aux sédiments apportés par une crue, les avantages peuvent être importants. Un échantillonnage systématique assure un contrôle sur les informations initiales que nous pouvons avoir sur les caractéristiques des sédiments issus d'une collecte d'une plus grande quantité de sédiments. Un échantillonnage systématique est plus coûteux, car il implique généralement davantage d'échantillons que ceux identifiés visuellement ensuite analysés en laboratoire.

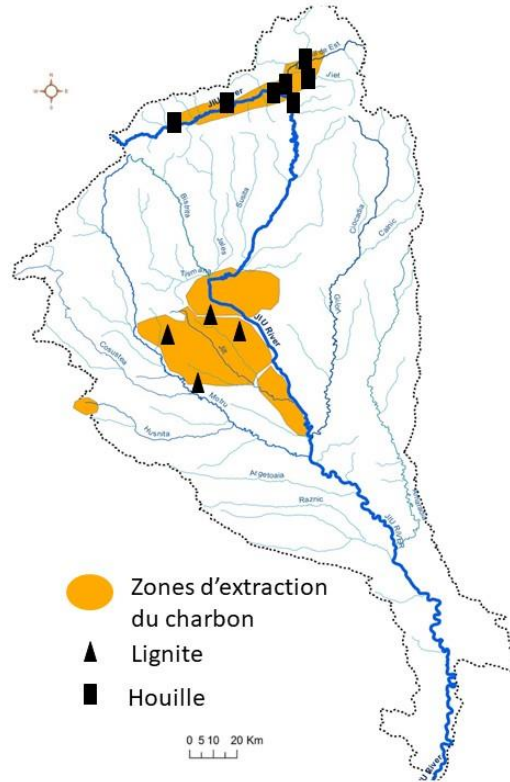
(ii) L'approche visuelle repose sur une observation des différentes couches de la tranchée : la couleur, la granulométrie, l'humidité, les éventuels objets séparateurs (branches, déchets en plastiques déposés par des crues en même temps que la couche des sédiments). Bien que ce soit un choix évident lorsque nous sommes sûrs d'avoir au moins quelques connaissances de base sur le contenu, les caractéristiques visuelles et la texture des couches de sédiments, cette stratégie peut également soulever le problème de ne pas distinguer sur place les couches composites. Cela peut conduire à une source d'incertitude lorsqu'il s'agit de couches épaisses de sédiments qui, apparemment, semblent avoir été déposées par un événement de crue unique, mais qu'un examen détaillé montre qu'elles peuvent également être décomposées dans d'autres sous-couches plus minces. Les avantages de cette stratégie sont qu'elle ne prend pas trop de temps pour échantillonner les couches et que nous pouvons utiliser les connaissances préliminaires à ce sujet dans la phase de validation. Les inconvénients, comme il a été dit, découlent de la subjectivité du chercheur sur la décomposition stratigraphique. En plus, on risque d'enlever du détail dans la caractérisation des couches.

En tenant compte de tous les arguments, nous avons finalement échantillonné à partir de l'observation visuelle des différentes couches, plus simple et rapidement mis en œuvre sur le terrain. Cet échantillonnage devra être validé ultérieurement par les résultats d'analyses physique et géochimiques. Selon cette stratégie, nous avons séparé 11 couches de sédiments que nous supposons avoir été déposées par le même nombre d'épisodes de crue.

### **8.2.3. Les échantillons de charbon brut des zones source**

Certaines analyses de laboratoire effectuées sur les sédiments déposés dans les lits des rivières et sur la berge de la Jiu reposent sur la comparaison des caractéristiques des particules de charbon avec celles du charbon dans les zones sources (rang de charbon, couleur, contenu chimique). Nous avons donc prélevé des échantillons de charbon brut, sur les sites des bassins miniers de Motru-Rovinari et de Petroșani.

Au total, 11 échantillons de charbon ont été prélevés, dont 7 de houille et 4 de lignite. Les uns d'entre eux ont été trouvés dans des zones sources potentielles de sédiments, telles que des versants sur ou à proximité de tas de stériles minier. D'autres ont été trouvés directement dans les lits des rivières (la Jiu de l'Ouest, la Jieț, la Jiu ou la Jilț), où ils provenaient très probablement du lavage du charbon dans les usines industrielles (extraction et préparation) en amont. Une troisième catégorie d'échantillons de charbon provenait des unités d'extraction et de traitement (des carrières ou des bandes de convoyeurs). La **Figure VIII.12** montre la distribution spatiale des points d'échantillonnage du charbon.



**Figure VIII.12.** Carte des points d'échantillonnage du charbon en vrac dans le bassin de la rivière Jiu

### 8.3. Méthodes de laboratoire pour l'analyse des échantillons

Ce sous-chapitre a pour objectif de présenter les différentes méthodes qui ont été mises en œuvre pour analyser les échantillons prélevés, et en premier lieu les différentes couches d'alluvions déposées lors des crues, au droit du site d'étude de la tranchée. Il ne s'agit pas d'une revue exhaustive des méthodes disponibles, mais d'une présentation synthétique des méthodes utilisées. Le critère initial de sélection de ces méthodes était le fait qu'elles peuvent être mises en œuvre à moindre coût. Au fur et à mesure de la progression du travail, nous avons aussi recherché d'autres méthodes qui étaient accessibles dans d'autres laboratoires et que nous avons mises en œuvre en collaboration, sans coût supplémentaire. Ces méthodes peuvent être groupées en 5 catégories :

**1. L'analyse granulométrique.** C'est évidemment la méthode la plus simple pour explorer les matériaux de la tranchée. Le **but** est de **confirmer** les différentes couches alluviales de la tranchée identifiées visuellement.

**2. La colorimétrie.** La différence de couleur nous a permis sur le terrain de distinguer différentes couches sédimentaires. Nous affinons cette analyse de manière quantitative avec une méthode utilisée en

géosciences issue de la médecine et de la biologie. Le **but** a été de distinguer les nuances de couleur des grains provenant de différentes sources.

**3. L'analyse d'images.** Cela suppose l'extraction d'informations significatives à partir de grains composant un échantillon de sédiment, principalement à partir d'images numériques au moyen de techniques de traitement d'images. Le **but** de cette analyse a été d'estimer la proportion de grains de charbon parmi les autres grains (inorganiques) des échantillons de sédiment.

Pour le bassin hydrographique de la rivière Jiu, les activités d'extraction de charbon dans le secteur supérieur (houille) et moyen (lignite) peuvent offrir des informations sur les zones de provenance des sédiments.

**4. La pétrologie organique** est une branche des sciences de la terre traitant de la présence, de l'origine et de la structure de la matière organique sédimentaire, telle que le charbon. L'analyse des échantillons de sédiments prélevés des lits des différents cours d'eau et leur comparaison avec les sédiments qui constituent les différentes couches peut nous aider à détecter une origine approximative des apports sédimentaires. Pour cette raison, nous allons mettre en place une série de méthodes de quantification de la matière carbonneuse à l'aide de la pétrologie organique. Le **but** des analyses portant sur la pétrologie organique a été de déterminer et quantifier les particules de charbon dans les sédiments.

**5. La géochimie.** Cette science étudie les éléments constitutifs des matériaux solides de la Terre. Elle sera appliquée pour analyser trois aspects: (1) le cycle du carbone organique total tel qu'il apparaît dans les échantillons de sédiments du bassin de la rivière Jiu ; (2) la géochimie organique qui nous indiquera les espèces de charbon présentes comme détritiques sédimentaires dans les dépôts alluviaux et (3) la géochimie des minéraux lourds et des lanthanides (ou terres rares) avec lesquels nous explorerons encore plus profondément les liens possibles entre les zones de dépôt des sédiments fluviaux et leurs origines issues de différentes unités géologiques.

Dans les sous-chapitres suivants nous détaillerons les principes de travail pour chacune des méthodes mentionnées en haut, nous discuterons des avantages et des inconvénients de leur utilisation dans le contexte de la dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu et nous conclurons sur leur possible exploitation future en termes de coûts, de temps, de pertinence et d'efficacité des résultats fournis.

Les différentes parties pour chaque méthode qu'on va présenter sont :

1. Principe de la mesure
2. Détails de la mise en œuvre / protocole
3. Avantages et inconvénients



## 8.2.1. La granulométrie

Les couches sédimentaires du lit majeur sont formées par le dépôt des sédiments fins transportés par suspension. Leurs caractéristiques granulométriques dépendent des conditions hydrauliques dans le moment du dépôt. Ainsi, la mesure de la granulométrie des sédiments de la tranchée est un indicateur des conditions locales de dépôt lors d'un événement de crue donné. L'hypothèse qu'on cherche exploiter est qu'une hétérogénéité de la granulométrie doit apparaître si les sédiments proviennent de crues différentes ou de conditions d'écoulement différentes au même épisode de crue.

Nous avons utilisé deux méthodes pour l'analyse granulométrique : 1) la distribution granulométrique par tamisage et 2) l'analyse des plus fines particules par granulométrie laser.

### 8.2.1.1. Granulométrie par tamisage

#### 8.2.1.1.1. Principe de mesure

Pour l'analyse granulométrique, nous avons utilisé des tamis, de tailles et d'ouvertures différentes, pour séparer les grosses particules (cailloux et sables) des fines (limons et argiles). La quantité de sédiment retenue par les mailles de tamis calibrées a été mesurée par pesée. Chaque tamis est superposé à un tamis dont le diamètre du maillage (le diamètre de Féret) suit une diminution progressive [Fournier *et al.*, 2012].

En fonction de la taille, il a été possible de séparer les différents types de matériaux granulaires non organiques ou organiques, notamment les sables, les argiles, le charbon, les poudres, d'un diamètre variant de 3,5 mm jusqu'à une taille minimale de 40  $\mu\text{m}$ .

Le protocole de tamisage demande une technique permettant d'assurer des données comparables pour les échantillons utilisés. Pour y parvenir, il a été nécessaire de déterminer certaines conditions ou normes [Meloy et Williams, 1991; Allen, 2003; Fournier *et al.*, 2012], telles que : la taille de l'échantillon; le type de tamisage; l'ordre des tamis; la méthode d'agitation, la durée du tamisage; le nettoyage du tamis après chaque échantillon; la pesée ; la détermination des fractions granulométriques.

Les échantillons ont été préparés dans le laboratoire, en respectant les étapes suivantes :

- Séchage à 105°C pendant une nuit, environ 250g d'échantillon ;
- Refroidissement au dessiccateur pour environ 5 h ;
- Lavage au nettoyeur à ultrasons pour éliminer les matières organiques de taille centimétrique tels que les petits morceaux de bois ou les feuilles des arbres ;
- Broyage fin à la main dans un mortier en porcelaine afin de bien mélanger les agrégats sédimentaires par rapport à la taille du tamis;
- Stockage temporaire dans des sachets transparents en plastique à usage unique, étiquetés et tenus loin des sources de chaleur et d'humidité.

Avant de le passer par les tamis, l'échantillon a été pesé. La série de tamis qu'on a monté commence par le bas dans la séquence suivante : base, tamis de 40, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 500  $\mu\text{m}$ , puis de 1 et 2,5 mm et ensuite la passoire de 3,5 mm. En ce qui concerne la durée totale du tamisage, nous avons généralement utilisé un temps standard de 15 minutes, par des mouvements circulaires horizontaux. Ces processus de mouvement sont caractéristiques du tamisage à la main et produisent un degré de tamisage plus élevé pour les particules plus denses (par exemple, l'argile) par rapport aux autres tamisages [ASTM D6913 / D6913M - 17].

Chaque fraction restant sur un tamis a été pesée à l'aide d'une balance de précision préalablement stabilisée, calibrée et protégée des courants l'air. Son pourcentage par rapport à la masse totale des échantillons a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$P_{\text{fraction } x(\%)} = \frac{M_{fr}}{M_{\text{total}}}$$

où le  $M_{fr}$  est la masse du sédiment pour un certain intervalle granulométrique et le  $M_{\text{total}}$  est la masse totale de l'échantillon.

Les résultats ont été présentés dans un graphique du pourcentage par rapport à la taille du tamis et ils ont été ensuite soumis à quelques traitements statistiques (concernant les diamètres caractéristiques ou le type de distribution de la courbe granulométrique).

L'étape suivante a consisté à trouver le pourcentage cumulé d'agrégats retenus dans chaque tamis. Pour cela, la quantité totale d'agrégat retenue dans chaque tamis a été additionnée à la quantité contenue dans les tamis précédents. Le pourcentage cumulé de passage de l'agrégat a été obtenu en soustrayant le pourcentage retenu de 100%, suivant la formule :

$$P(\%) \text{ cumulé } < \text{une fraction} = 100\% - M_{\text{fraction supérieure}} (\%)$$

Dans une prochaine étape, nous avons déterminé les fractions de poids relatif à chaque type de matériel constitutif (du gravier, du sable, des argiles et des limons). Généralement, les fractions s'encadrent dans les intervalles suivants : les argiles et les limons (<63 $\mu\text{m}$ , granulométrie fine), le sable (<2mm - > 63 $\mu\text{m}$ , granulométrie moyenne) et le gravier (> 2mm, particules grossières). Comme pour l'analyse générale de la distribution des grains par classes granulométriques, les fractions fines, moyennes et grossières ont été calculées et exprimées en pourcentage.

#### **8.2.1.1.2. Avantages et inconvénients**

Nous avons procédé au tamisage à sec, ce qui est une pratique courante dans l'analyse des sédiments, mais qui peut comporter des inconvénients en ce qui concerne l'efficacité de la séparation des petits grains des grains de grande taille. Par contre, le tamisage humide a l'avantage de nettoyer le matériau s'il contient des particules de limon et d'argile, si l'on s'intéresse particulièrement aux classes de

granulométrie de ce type, mais le procédé présente l'inconvénient de durer longtemps [ASTM D6913 / D6913M - 17]. Ainsi, dans le cas d'un échantillon plus homogène, de grains de taille similaire, le film d'eau qui se forme sur les particules ne permet pas une séparation complète [Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2011].

Pour les matériaux un peu plus grossiers, une analyse par tamisage et une répartition granulométrique sont considérées comme des méthodes précises et cohérentes [Schiavone et Coquery, 2011]. Cependant, pour les matériaux plus fins que 100 mesh<sup>39</sup>, le tamisage à sec peut être nettement moins précis. En effet, l'énergie mécanique nécessaire pour faire passer les particules par une ouverture et les effets d'attraction de surface entre les particules elles-mêmes et entre les particules et le tamis augmentent à mesure que la taille des particules diminue. La suspension des particules dans un liquide approprié transporte le matériau fin à travers le tamis beaucoup plus efficacement que le secouage du matériau sec [Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2011].

L'analyse par tamis suppose que toutes les particules seront rondes (sphériques) ou presque et passeront à travers les ouvertures carrées lorsque le diamètre des particules est inférieur à la taille de l'ouverture carrée de l'écran [Allen, 2003]. Pour les particules plates et allongées (comme c'est le cas avec les grains de charbon de nos échantillons), une analyse au tamis ne produira peut-être pas de résultats fiables en masse, car la taille de particule rapportée supposera que les particules sont sphériques. En effet, une particule allongée pourrait passer d'un de ses côtés à travers le tamis sans qu'elle soit réellement dans l'intervalle granulométrique suivant [ASTM D6913 / D6913M - 17].

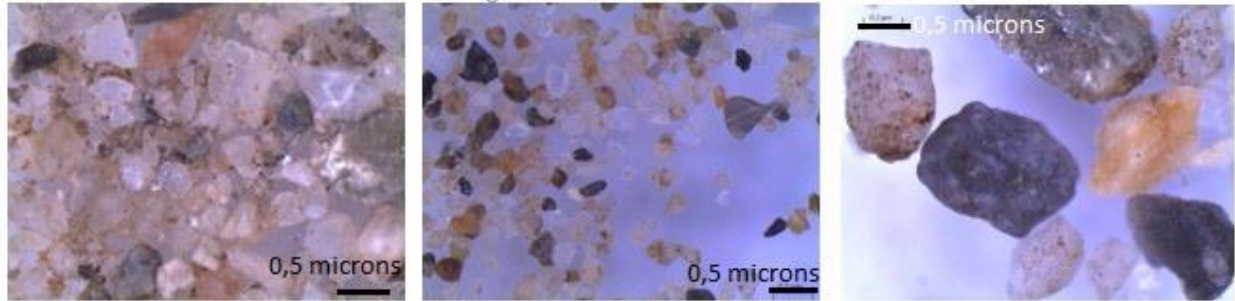
Même si cela n'a pas été pris en compte dans les résultats finaux de l'analyse granulométrique, la précision est également importante, celle-ci étant principalement affectée par les formes des particules. Ceci est expliqué par le fait que lorsque l'élongation et des particules deviennent plus grandes, les diamètres obtenus à partir de l'analyse de tamis deviennent plus une idée fautive. Dans nos échantillons, en fonction de leur origine, de la matière charbonneuse ou des particules minérales, les formes et la planéité varient largement. À titre d'exemple, alors que les particules minérales peuvent prendre des formes connues, les grains de charbon peuvent être hétérogènes ou plats d'un côté, selon le processus industriel et le temps passé dans la rivière.

En plus de la forme de particule affectant la validité du tamisage, il peut y avoir un certain nombre d'erreurs qui peuvent ou non être importantes, selon l'équipement disponible : tamisage incomplet (si la durée pour séparer toutes les particules n'est pas suffisante, en particulier pour obtenir les fines), la manipulation défectueuse, les dommages de maille (ouvertures de maille remplies ou maille manquante).

---

<sup>39</sup> Unité de mesure dans la granulométrie. Voir explications dans le Tableau des unités de mesure

La forme des particules dépend de la composition minéralogique (**Figure VIII.16**). L'inconvénient avec la méthode du tamis est évident ici, parce que cela ne nous permet pas de bien distinguer les particules plus fines (inférieures à 40 microns) et de les classer. Dans une telle situation, la mesure de la granulométrie pour les plus fines avec la granulométrie laser semble incontournable.



**Figure VIII.16.** Particules de sable vs. le charbon – des formes et des tailles différentes

## 8.2.1.2. La granulométrie laser

### 8.2.1.2.1. Principe de mesure

L'appareil utilisé est un MASTERSIZER 2000 (Malvern Instruments). La technique de diffraction laser repose sur le principe que les particules traversant un faisceau laser diffusent la lumière selon un angle directement lié à leur taille: les grosses particules se dispersent à faible angle, tandis que les petites se dispersent à grand angle [Malvern Master Sizer, 2018]. La lumière d'un laser est projetée sur un nuage de particules en suspension dans un dispersant (gaz ou liquide) et celle-ci est mesurée par une série de photodétecteurs placés à différents angles [Horiba Instruments, 2017]. La diffraction laser est décrite avec précision par l'approximation de Fraunhofer et la théorie de Mie, avec l'hypothèse de la morphologie sphérique des particules. Le diagramme de diffraction peut être utilisé pour mesurer la taille des particules en utilisant la théorie de Mie ou Fraunhofer [Hahn, 2009].

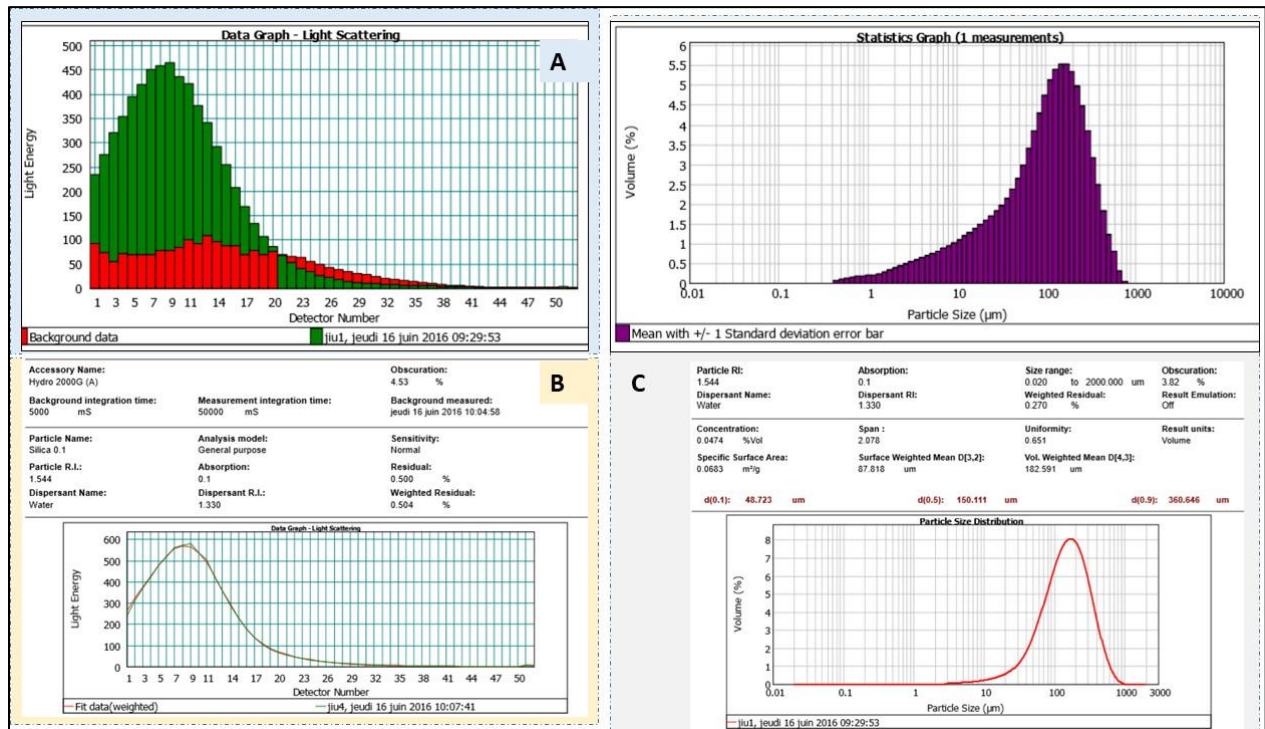
La méthode permet de distinguer des tailles dans la gamme [1 mm - 0,02  $\mu\text{m}$ ). La préparation des échantillons a été la même que dans le cas de la méthode traditionnelle d'analyse granulométrique par tamisage (voir §8.2.1.1).

Nous présentons en bas le protocole de mesure :

- Étant donné que les grains plus grands de 2 mm peuvent obstruer l'appareil [Horiba Instruments, 2017] et que la mesure de la granulométrie à diffraction laser se prête plutôt aux granules de forme sub-sphérique [Fournier *et al.*, 2012] et de plus on n'a pas disposé des tamis à 1 – 2 mm ouverture, on a utilisé que la fraction <1 mm

- De chaque échantillon, plusieurs dizaines de grammes de sédiment de diamètre <1 mm ont été séparés et stockés dans des piluliers en plastique transparents.
- Pour chaque mesure, 5g de sédiment ont été séparés du pilulier avec une spatule pour échantillons de poudre, pesés à l'aide de la balance analytique et introduit dans la cuve de l'appareil. Des suspensions concentrées, de l'ordre de 1,0 [% en poids], ont été préparées automatiquement en utilisant l'eau distillée.
- Au début de la mesure, un traitement par ultrasons pour briser des agglomérats mal tenus a été programmé.
- Chaque échantillon a été soumis à 10 mesures, chacune d'une durée de 10 minutes.
- La moyenne de ces 10 mesures a été considérée comme distribution granulométrique finale et moyenne de chaque échantillon de sédiment.

Pour chaque échantillon, nous nous sommes assurés que les mesures étaient précises, par deux paramètres : un signal de fond stable et des échantillons propres [Sysmex, 2015]. Les valeurs de fond doivent montrer une diminution progressive sur toute la plage du détecteur (*Figure VIII.14.a.*), tandis que la courbe d'ajustement doit donner une bonne dispersion des valeurs. La qualité de l'ajustement des données est quantifiée par les valeurs résiduelles, qui doit rester <5% (*Figure VIII.14.b.*). Dans le cas d'une valeur résiduelle trop élevée, les mesures ont été répétées et on ne retient que les résultats obtenus avec le résidu le plus faible.



**Figure VIII.14.** Schéma de mesure et d'ajustement de la granulométrie laser pour un échantillon exemple



L'obscurcissement trop élevé (connue comme dispersion multiple) peut être à l'origine d'une mauvaise valeur résiduelle, soit à cause d'une sélection incorrecte du modèle de calcul, soit à cause de l'échantillon lui-même (mélange de composants et de couleurs foncées des grains). De même, en termes d'obscurcissement, il a fallu optimiser la courbe d'ajustement et vérifier si l'obscurcissement rouge et bleu était maintenu stable entre les mesures (*Figure VIII.14.c.*) L'objectif a été de maintenir l'obscurcissement en dessous de 15%.

L'obscurcissement et les résiduels ont été testés pendant la mesure afin de respecter le principe de répétabilité. Cela signifie qu'au moins deux résultats des mesures pour un échantillon ont été comparés avant de choisir l'ajustement final. De cette manière, nous nous sommes assurés non seulement de choisir la meilleure distribution granulométrique en termes de minimisation des valeurs résiduels et de l'obscurcissement, mais également que les différentes mesures d'un échantillon soient reproductibles et reflètent réellement ses caractéristiques granulométriques.

La distribution granulométrique des sédiments fins a été ensuite présentée par surface et en nombre dans le chapitre §8.3. Les résultats obtenus permettent aussi de tracer la courbe de distribution granulométrique (distribution volumique) et de calculer des paramètres tels que le diamètre moyen, i.e.  $D(0,1)$ ,  $D(0,5)$ ,  $D(0,9)$ , qui peuvent être ensuite corrélés avec l'épaisseur des couches, ou bien d'effectuer de calculs statistiques tels que l'écart type et la variance.

#### **8.2.1.2.2. Avantages et inconvénients**

A l'échelle micrométrique, la granulométrie laser peut être une bonne approche méthodologique, avec des résultats fiables pour les fractions fines des sédiments. Cette méthode est très efficace pour déterminer la distribution granulométrique des échantillons plus homogènes, mais elle peut donner des erreurs dans le cas des échantillons à taille dispersée. En fonction du protocole adopté, l'analyse de l'échantillon ne prend que quelques minutes, mais cela peut se répéter dans les cas où un des paramètres d'ajustement de la courbe granulométrique n'est pas dans le bon intervalle. Les limites de cette méthode apparaissent pour les petites tailles ( $<1$   $\mu\text{m}$ ], théorie de Mie), pour les particules non sphériques et pour les matériaux à faible indice de réfraction par rapport au milieu dispersif. Un autre avantage réside dans la préparation des suspensions principalement avec de l'eau, mais d'autres solvants peuvent également être utilisés (éthanol, isopropanol ou octane).

Un premier inconvénient de cette méthode est bien entendu le coût élevé de l'acquisition et de l'entretien de l'instrument de mesure. Un autre inconvénient réside dans le type de granules détectés par le faisceau laser, car il est moins efficace lorsque les particules sont trop claires ou trop sombres. Comme nous le montrerons en §8.3., Deux paramètres de la mesure de la granulométrie laser (obscurcissement et résidus)

peuvent poser des problèmes (leurs valeurs peuvent dépasser la limite maximale ou être trop bas), lorsque l'échantillon est composé de trop nombreux granules de nuances extrêmes, tels que sous forme de mica blanc, de quartz brillant ou de charbon noir. Dans une telle situation, les résultats devront être interprétés avec une marge d'incertitude et des précautions devront être prises lors de l'examen de la distribution du charbon contenu dans les granules fins des échantillons.

### 8.3.3. La colorimétrie

#### 8.3.3.1. *Etat de l'art*

La colorimétrie (une catégorie de la spectroscopie en visible) est une technique plutôt rapide, peu coûteuse, non destructive et simple, souvent utilisée après les années 2000 dans les domaines visible (VIS), proche infrarouge (NIR) et moyen infrarouge (MIR) afin de quantifier les propriétés du sol [Viscara Rossel *et al.* 2006]. Plus récemment, la spectroscopie a été appliquée au traçage des sources de sédiments en suspension et a prouvé sa capacité à discriminer et quantifier divers matériaux sources dans des échantillons de sédiments en suspension [Poulenard *et al.* 2009; Martínez-Carreras *et al.* 2010a, b]. Jusqu'à présent, les données de réflectance spectrale ont été utilisées de trois manières différentes :

- (i) les coefficients de couleur déduits des spectres VIS ont été utilisés directement dans un modèle de mélange optimisé en tant que propriétés d'empreinte digitale potentielles [Martínez-Carreras *et al.* 2010a].
- (ii) les spectres VIS / NIR ont également été utilisés pour prédire les concentrations d'empreintes digitales géochimiques spécifiques et ont été ensuite utilisés dans un modèle de mélange optimisé [Martínez-Carreras *et al.*, 2010b].
- (iii) les spectres NIR / MIR ont été utilisés pour estimer la proportion des différents matériaux sources dans des échantillons de sédiments en suspension après avoir effectué un étalonnage de régression partielle par les moindres carrés sur des mélanges de matériaux source artificiels [Poulenard *et al.* 2012].

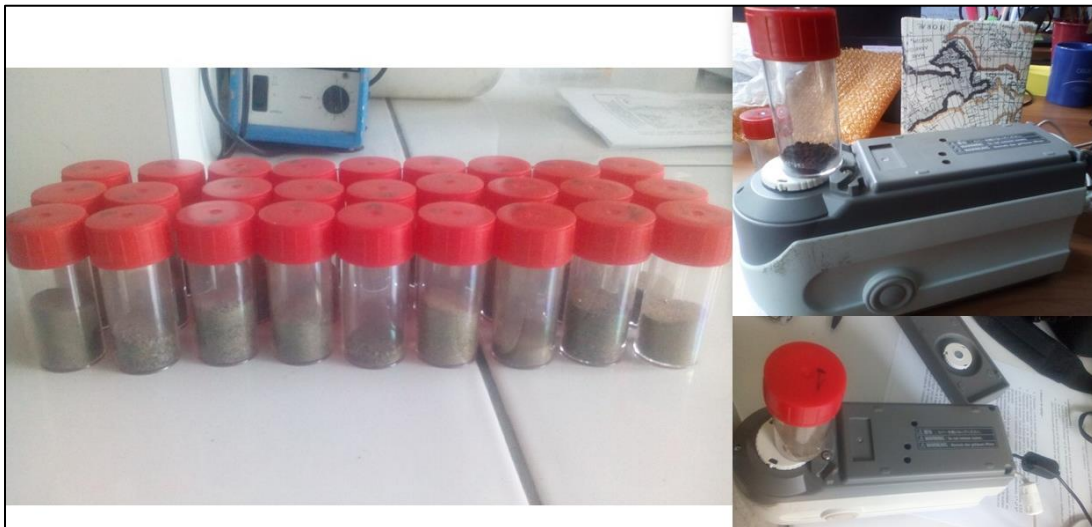
Cependant, jusqu'à présent et à notre connaissance, rien n'a été fait pour utiliser les spectres VIS et les paramètres colorimétriques déduits en tant que prédicateurs potentiels de la proportion des différents matériaux de base dans les échantillons de sédiments en suspension. La mesure des spectres VIS est reconnue comme un bon prédicteur des constituants du sol [Debret *et al.* 2011] et elle est reconnue comme une méthodologie simple, encore plus rapide et moins chère que les méthodes à infrarouge. Cependant certaines hypothèses doivent être vérifiées avant de les utiliser comme traceur potentiel dans le cadre d'une étude d'empreintes digitales. Le traçage d'une source de sédiments en suspension à partir des mesures du sol et des sédiments en suspension à la sortie du captage suppose que les signatures du sol source sont préservées [Foster et Walling, 1994].

### 8.3.3.2. Préparation des échantillons

Lors de la préparation des échantillons de sédiments et de charbon en vrac pour les mesures de colorimétrie, plusieurs procédures ont été suivies: (i) la préparation des sédiments fluviaux: séchage dans un four à 105 ° C, concassage manuel à l'aide d'un mortier de porcelaine, tamisage 63 µm à l'aide de tamis métalliques, nettoyage par ultrasons pour éliminer les particules organiques; (ii) la préparation des échantillons de charbon en vrac : les grosses particules ont été broyées dans un mélangeur de laboratoire avant de les soumettre à un tamisage manuel sur différentes fractions granulométriques (<63 µm, 40 µm et 20 µm), ensuite les signatures spectro-colorimétriques spécifiques des deux espèces de charbon ont été déterminées. Après ces étapes préparatoires, les échantillons de sédiment et de charbon ont été stockés dans des récipients en plastique transparent de 40 ml dont les couvercles ont été numérotés.

### 8.3.3.3. Méthodes de mesure

Afin de faire la distinction entre les sous-bassins versants, ainsi qu'entre les zones sources du matériau sédimentaire atteignant la rivière Jiu, des mesures spectroscopiques ont été effectuées à la fois sur les échantillons de sédiment séché et de charbon en vrac. Un spectrophotomètre portable à réflectance diffuse (Konica Minolta 2600d) a été utilisé pour déterminer, par spectroscopie de réflectance visible (VIS), la proportion de matières brutes (les deux espèces de charbon dans la fraction minérale d'origines diverses des sédiments fins). Le spectrophotomètre portable intègre ses mesures sur un cercle de rayon 3 mm. Il a été installé à l'envers, face vers le haut, et les tubes contenant les échantillons ont été placés sur la cellule de mesure. Ainsi, la mesure a été prise directement à travers la base du tube (*Figure VIII.15*).



**Figure VIII.15.** Protocole de la mesure de la colorimétrie

Pour tenir compte de l'hétérogénéité des propriétés colorimétriques des échantillons et éviter d'éventuelles erreurs de mesure et signaux non spécifiques, nous avons effectué trois mesures pour chaque

échantillon, le récipient étant agité entre chaque mesure [Legout *et al.*, 2013]. La quantité minimale d'échantillon a été d'environ 100 mg. Durant une mesure, le spectrophotomètre a émis une source de lumière à arc au xénon standard et a mesuré le rapport entre la lumière réfléchiée par l'échantillon et celle d'un étalon blanc. Toutes les mesures ont été prises avec l'illuminant standard D<sub>65</sub>, l'observateur à angle de 10° et la composante spéculaire exclue. Le spectrophotomètre a été étalonné avant chaque série de mesures en effectuant un étalonnage du zéro et un étalonnage du blanc. Des mesures de contrôle ont également été prises régulièrement pendant et à la fin d'un ensemble de mesures ; le dernier consistait en des mesures sur des panneaux rouges, verts et jaunes ainsi que six échantillons de sol contrastés.

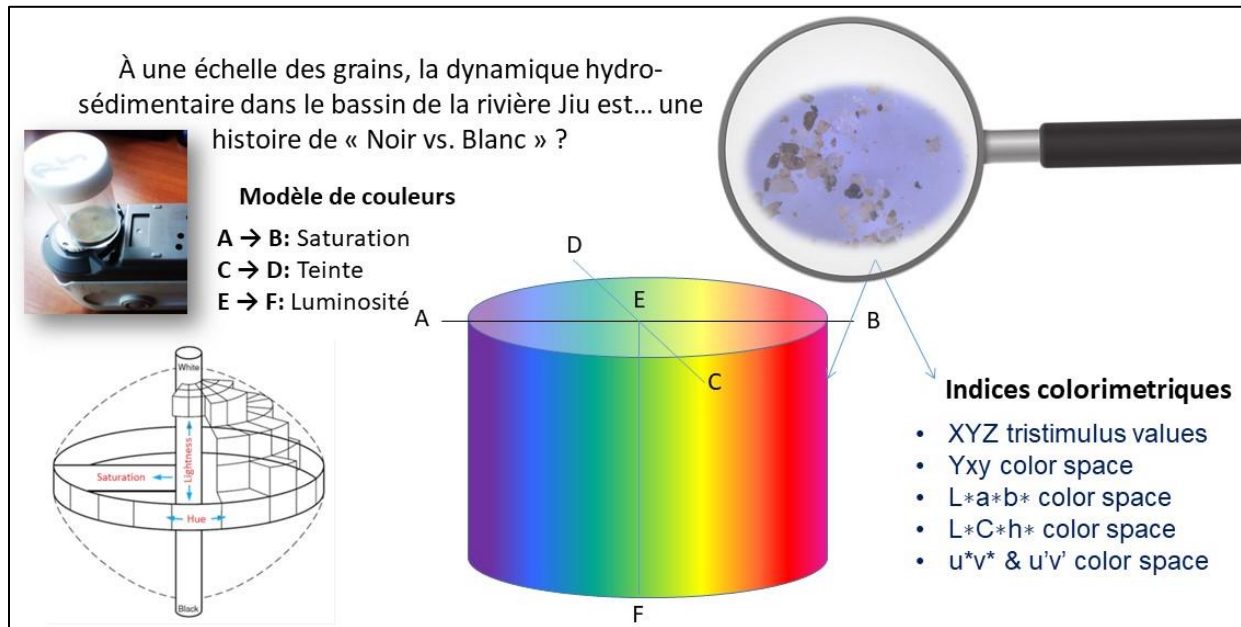
La technique explore les trois dimensions (teinte, luminosité, saturation) d'un solide. Les valeurs du tristimulus XYZ ont été premièrement calculées sur la base des fonctions de correspondance des couleurs définies en 1931 par la Commission internationale de l'éclairage (CIE 1931). Nous avons ensuite transformé les tristimuli normalisés aux systèmes de coordonnées CIE (L\*, a\*, b\*) à l'aide des équations données dans CIE (1978). Au fil du temps, divers systèmes de codage par couleur sont apparus [Konica Minolta, 2009], parmi lesquels nous mentionnons les suivants : Système de Notation Munsell (HVC) ; Valeurs de tristimulus XYZ; Espace de couleurs L\* a\* b\*. La réflectance spectrale a été mesurée entre 360 et 740 nm avec une résolution de 10 nm sur des particules de sédiment inférieures à 63 µm après tamisage [Viscara Rossel *et al.*, 2006]. Les données brutes recueillies étaient le pourcentage de réflectance spectrale pour chacune des 39 classes de longueur d'onde. À partir de ces données brutes, nous avons dérivé huit composants de divers modèles de colorimétrie [Viscara Rossel *et al.* 2006]. En fonction de l'intensité de la couleur des sédiments et de la proximité du noir ou du blanc, la réponse spectro-colorimétrique est différente. À titre indicatif, la **Figure VIII.16** montre comment plus l'échantillon est propre, plus le signal spectro-colorimétrique obtenu est élevé.



**Figure VIII.16.** Différences entre la couleur d'un échantillon propre (sans charbon) et un autre avec des particules de charbon

De même, plus la quantité de charbon présente dans l'échantillon de sédiment est faible, plus le rapport entre la lumière réfléchie provenant de l'échantillon et un étalon blanc est faible, car l'échantillon soumis à la mesure se comportera comme un corps noir absorbant l'éclairage au xénon standard émis par le spectrophotomètre.

Ensuite, les indices colorimétriques ont été calculés à partir du pourcentage de réflectance spectrale pour chacune des 39 classes de longueur d'onde. Ils ont été intégrés dans des modèles statistiques pour identifier la distribution spatiale du signal spectro-colorimétrique indiquant la présence de charbon dans les sédiments (*Figure VIII.17*).



**Figure VIII.17.** Le schéma d'analyse colorimétrique

Après le traitement du signal spectro-colorimétrique, des modèles de classification statistique, une analyse factorielle et des corrélations ont été réalisés afin de déterminer si les particules de charbon trouvées dans les échantillons de sédiments et de charbon du bassin de la rivière Jiu pouvaient être utilisées pour prédire la proportion de charbon dans les échantillons de sédiments de la rivière Jiu plus en aval. Dans la quête de la relation entre les sources de sédiments fluviaux enrichis en charbon de l'amont et les accumulations en aval, la méthode de détection d'interaction automatique du chi carré (CHAID) a ensuite été utilisée pour étudier le taux de prédiction d'un échantillon appartenant à un groupe ou à un autre. À cette fin, des classifications ont été effectuées en séparant les échantillons de charbon et de sédiments en différentes classes.



### 8.3.4. Analyse d'image

Le but de cette analyse a été de quantifier le pourcentage des grains de charbon parmi d'autres particules composantes (inorganiques) d'un échantillon de sédiments. Le principe de base de cette approche repose toujours sur les propriétés visuelles des sédiments, cette fois-ci la couleur et la forme des particules de charbon. C'est une analyse à une échelle plus fine que celle de la colorimétrie, car on peut voir les particules de sédiments dans un échantillon et les classer sur des critères visuels.

L'analyse d'image suppose trois étapes majeures : a) Acquisition de l'image ; b) Correction de l'image (contraste, sharpness/piqué, résolution) et c) Ciblage des grains de charbon en comparant deux images du même échantillon (RGB vs. Blanc-noir)

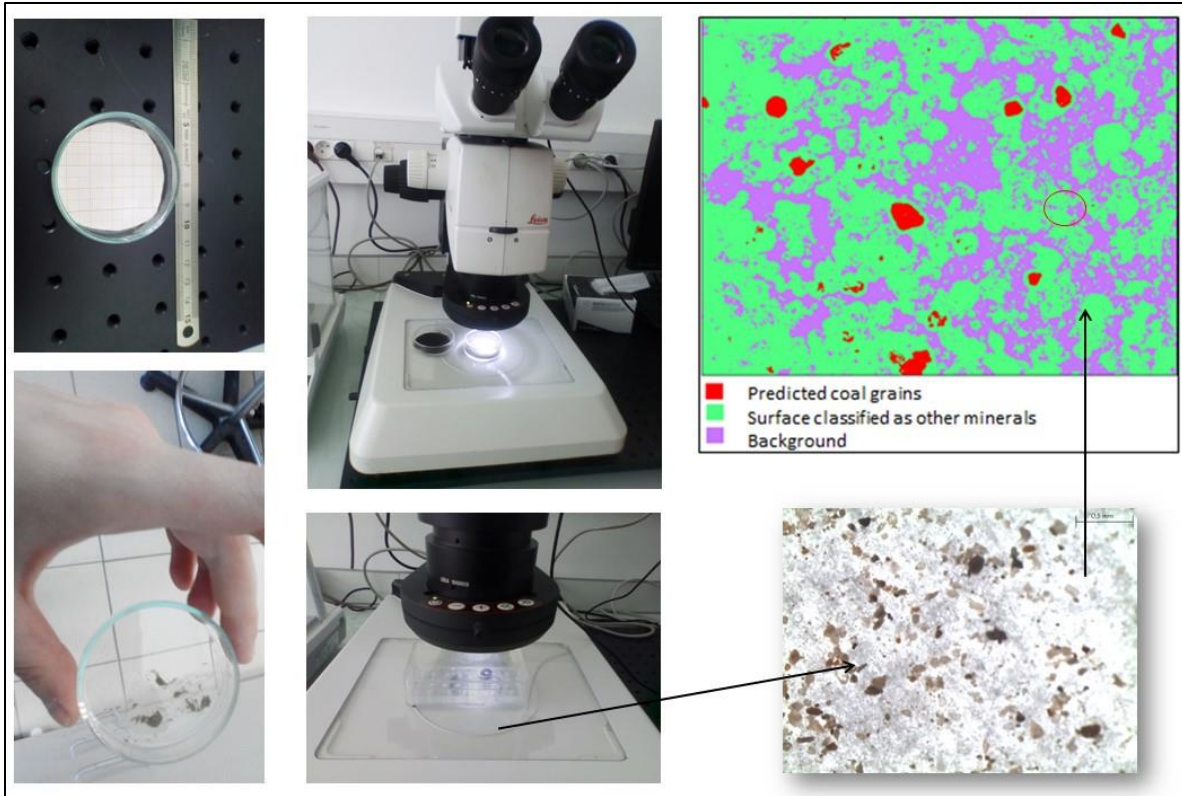
Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une loupe binoculaire Leica LAZ sur des sédiments tamisés jusqu'à une taille de particule <63 µm. Nous avons traité uniquement les échantillons de sédiments, et non ceux de charbon en vrac.

Le protocole de capture d'images a nécessité la préparation préalable d'une feuille de papier de fond blanche de 3 × 3 cm sur laquelle les particules de sédiment de chaque échantillon ont été uniformément dispersées. Les images sur la loupe binoculaire ont été prises en lumière directe et indirecte, conformément aux caractéristiques photométriques présentées dans le **Tableau VIII.2**.

**Tableau VIII.2.** Paramètres d'analyse de l'image à la loupe binoculaire

Image Calibration		Dimensions	
Background - graph paper	Calibrated image size	Zoom	Resolution
1 pixel = 0.0013 mm	2.58 x 1.93 mm	5x	24 bits/pixel
Image type	Brightness	Gamma	Saturation
Colour and Black & White	32%	0.7	135

Trois images de ce type présentant les caractéristiques susmentionnées de chaque échantillon ont été utilisées pour obtenir une estimation moyenne du pourcentage de particules de charbon. La classification a été réalisée à l'aide de l'algorithme Traceable Weka Segmentation du logiciel de traitement d'images ImageJ [Prodanov et Verstreken, 2012; Arganda-Carreras *et al.*, 2017]. Pour chaque image, 3 classes ont été considérées : grains de charbon, autres particules (minérales), arrière-plan (**Figure VIII.18**). Le pourcentage moyen pour chaque classe, en particulier le grain de charbon, a été déterminé à l'aide d'un plug-in de synthèse des couleurs d'image dans R Studio.



**Figure VIII.18.** Un exemple de protocole et de résultat de la classification supervisée de l'image

Une fois les photographies à l'échelle 5x de chaque échantillon enregistré, nous avons procédé aux analyses d'image. Pour ce faire, le logiciel ImageJ a été utilisé, qui a été conçu par Wayne Rasband, travaillant pour la Direction de Recherche Scientifique de l'Institut National pour la Santé Mentale de Bethesda, Maryland. Il s'appelle ImageJ parce qu'il est écrit dans le langage Java. Sa première Edition, la version 0.50, a été lancée en 1997 [Abramoff *et al.*, 2004]. Pour traiter l'image, nous avons utilisé le logiciel Fiji, une version plus récente d'ImageJ, développée par une équipe internationale et financée par des diverses sources. Fiji est un paquet de traitement des images basé sur ImageJ et peut afficher, éditer, analyser, traiter, sauver et imprimer images en couleur 8-bit et en échelle de gris, 16-bit intègre et images 32-bit virgule flottante. Il peut lire des divers formats d'image, tels que TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS et formats RAW.

Par défaut, le plug-in commence avec 2 classes et va produire une classification binaire des pixels. L'utilisateur peut ajouter des traces aux 2 classes en utilisant l'entier set d'outils pour le dessin ROI (région d'intérêt) qui est disponible dans Fiji.

Les valeurs doivent être manuellement confirmées avant de passer à des mesures plus systématiques. (P.B. : en supposant que j'ai bien interprété, tu dis 2 fois la même chose).

Une première étape de l'analyse sous la loupe binoculaire a été utilisée pour la détection du charbon parmi les autres particules sédimentaires à travers le seuillage de l'histogramme. Une seconde étape a été la classification et la segmentation des images (Trainable Weka Segmentation Plugin dans Fiji): On distingue deux zones d'intérêt – particules de charbon ou particules autres que le charbon dans la composition des sédiments. La mesure du pourcentage de la surface des sédiments de charbon et parmi les autres sédiments minéraux, utilise deux fonctionnalités des images – le brouiller gaussien (Gaussian blur) et la matrice hessienne (Hessian matrix).

Dans ce qui suit, nous décrivons les algorithmes morphométriques de segmentation (classification des images des granules de sédiments obtenues). En tant qu'instrument de classification des pixels, Trainable Weka Segmentation<sup>40</sup> a été employé parce qu'il présente une gamme vaste d'applications. Pour une segmentation réussite d'une image, il est important d'avoir une connaissance antérieure de la composition de l'image, par exemple les propriétés de texture de l'arrière-plan et les objets d'intérêt. Généralement, un algorithme typique inclut les pas suivants:

- étapes de traitement préliminaire (preprocessing), qui réduisent la variation spatiale de l'image ;
- seuillage, qui produit une ou plusieurs masques binaires ;
- masquage de la sélection Région d'Intérêt (Region of interest – ROI) ;
- étapes de traitement postérieur, par exemple l'inclusion d'un deuxième seuillage ou l'ajustement des paramètres (parametric fitting) ;
- mesure finale du volume, de la surface, des ongles etc.

Le flux de travail détaillé pour compter et déterminer la distribution des dimensions d'une collection de granules contenant aussi des particules de charbon est reproduit dans le **Tableau VIII.3**:

**Tableau VIII.3.** Pas de travail pour classier les images des granules de sédiments selon le contenu apparent de charbon, basé sur l'analyse visuelle

<b>Pas</b>	<b>Analyse</b>	<b>Commande</b>
<i>I) Préparation de l'image et ajustements préliminaires</i>	Conversion de l'image en couleur scannée des granules de sédiments dans une image en échelle de gris (grayscale)	<i>Image -&gt;Type -&gt;8-bit</i>
	Détermination et fixation de l'échelle de mesure, en traçant à priori une ligne sur une section de 50 mm	<i>Analyze → Set Scale</i>

<sup>40</sup> Formable (trainable) : ce plug-in peut être formé pour apprendre les contributions de l'utilisateur et d'effectuer après la même tâche dans sur une pièce de donne (test) inconnues.

Weka: il utilise tous les outils puissants et les instruments de classification de la version la plus récente de Weka. Segmentation: offre un résultat étiqueté sur la base de la formation d'un classificateur choisi.

2) <i>Seuillage<sup>41</sup> automatique de l'image</i>	Le seuillage a été fait en utilisant la routine automatique, en fonction des classes établies. Nous avons fixé trois classes : particules de charbon ; particules d'autres types de sédiments, pixels de fond (la couleur blanc – jaune avec des ombres de la feuille sur laquelle les granules ont été répandues)	<b>Process</b> → <b>Binary</b> → <b>Make Binary</b>
3) <i>Calcul du pourcentage occupé par chaque classe</i>	Le calcul de la zone couverte par des granules/particules de charbon parmi les granules/particules appartenant aux autres sources géologiques	<b>Analyze</b> → <b>Analyze Particles</b>
	Si on veut tracer le contour de la zone analysée, afin de vérifier si les particules de sédiments ont été bien classées dans une catégorie ou l'autre, une opération supplémentaire est d'introduire une dimension minimale de ces particules (à l'échelle de notre analyse cette dimension est de l'ordre de quelques dizaines de µm), afin de séparer par contour toutes les granules individuels de sédiments, même si elles font partie de la même classe.	<b>Show Outlines</b> → <b>Display</b> → <b>OK</b>
4) <i>L'automatisation des autres images avec les mêmes couleurs, teintes, ombrage et caractéristiques de forme des particules<sup>42</sup></i>	Afin de fixer le seuil de la nouvelle image des sédiments utilisant les réglages automatiques ou manuels, en fonction des similarités entre les échantillons de sédiments en ce qui concerne la teinte et la couleur, dimension et forme des granules/particules, la densité des granules, éclairage de l'image, il faut : <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'abord ajuster la valeur du seuil</li> <li>- ensuite marquer toutes les granules/ particules de charbon en rouge (ou d'autres couleurs), afin de les rendre reconnaissables ;</li> <li>- valider le choix.</li> </ul> Toute procédure automatisée se construit à la base d'un réglage manuel du seuil, qui inclut toute la zone couverte par le charbon.	<b>Image</b> → <b>Adjust</b> → <b>Threshold</b> → <b>Apply</b>
5) <i>Conservation des résultats</i>	Les données obtenues (histogrammes des pixels selon les valeurs seuillées, des résultats statistiques de base sur la distribution des valeurs) doivent être copiées dans un document séparé. Un sommaire du nombre de particules est aussi affiché dans une autre fenêtre.	Il y a différentes façons de conserver les résultats, la plupart en utilisant les options de la fonction <b>Export</b>

<sup>41</sup> Le seuillage est effectué à l'aide d'un opérateur d'étiquetage. Par définition, cet opérateur étiquette un pixel dans l'image seulement dans le cas où son intensité  $g$  dépasse une certaine valeur  $T_{\min}$ :

$\text{Tra}[g(x) \geq T_{\min}] : g(x) \rightarrow 1(x)$ , où 1 est l'étiquette binaire du pixel, qui dénote la valeur d'arrière-plan et  $g$  – l'intensité du pixel aux coordonnées du vecteur  $x$ . Il y a des diverses façons de proposer une valeur  $T_{\min}$  sur la base des variables statistiques zonales ou régionales. Les méthodes les plus populaires sont Otsu, l'entropie maximale et seuillage de percentile. Un bon examen des techniques de seuillage se trouve dans Sezgin et Sankur (2004).

<sup>42</sup> Ce pas n'est valable que pour les images des échantillons similaires, ayant une granulométrie proche une couleur des particules proches. Sinon, la procédure de segmentation d'image se répète manuellement pour chaque échantillon

Après la classification des images, le rapport visuel approximatif des particules de charbon dans chaque échantillon de sédiment a été obtenu. Enfin, nous avons utilisé la relation entre la couleur des sédiments et la "teneur en charbon" d'après l'analyse d'image, l'analyse factorielle (ACP), la régression linéaire et des corrélations simples.

### **8.3.5. La pétrologie organique**

#### *8.3.5.1. État de l'art et principe de la méthode*

La pétrologie organique s'est développée à partir du XX<sup>e</sup> siècle, consacrée à l'étude du charbon en raison de son utilisation dans l'industrie. La pétrologie du charbon était alors considérée comme une branche de la science du charbon [Suarez - Ruiz *et al.*, 2012]. Plus tard, cette discipline s'est étendue aux intérêts des autres composantes organiques. Elle est aujourd'hui l'outil le plus utilisé dans l'étude de la matière organique dispersée dans les roches sédimentaires en raison de son importance dans l'exploration des ressources en combustibles fossiles [Taylor *et al.*, 2000].

Les composants organiques sont reconnus au microscope sur la base de leur couleur (lumière réfléchiée et transmise), de leur fluorescence, de leur réflectance et de leur morphologie. Ces composants sont nommés macéraux. La pétrologie organique permet de mettre en place d'autres analyses et de déterminer le comportement de ces composants dans l'environnement de production, transport et dépôt, lors des processus technologiques tels que la combustion, la liquéfaction, la pyrolyse et autres [ISO 7404-5/2009]. L'origine des macéraux est différente et reflétée dans leurs propriétés optiques.

En ce qui concerne leur origine, les macéraux se divisent en trois groupes : Vitritinite, Lipinitite et Inertinitite [Taylor *et al.*, 2000]. Les propriétés optiques ne dépendent pas seulement de l'origine des macéraux individuels, mais elles dépendent également du degré houillification, du processus physique et chimique complexe au cours duquel la teneur en carbone augmente et la teneur en oxygène et en hydrogène diminue [Misz-Kennan et Fabiańska, 2011; Suárez-Ruiz, 2012].

À l'heure actuelle, la pétrologie organique est une discipline largement reconnue pour son rôle dans la recherche fondamentale et appliquée en ce qui concerne, à la fois, l'étude du charbon et les géosciences. Elle a de nombreuses applications, par exemple dans la détermination de l'origine des roches sources de charbon et de pétrole, dans l'industrie, l'archéologie, les études des matériaux carbonés et environnementales. Dans notre étude, les outils de la pétrologie organique ont été utilisés pour déterminer les types macéraux et le contenu en charbon des échantillons, ainsi que le degré de carbonification à partir de la matière organique. Cela pourrait indiquer la source / les sources possibles de particules de charbon dans les sédiments et établir si les particules organiques ont le même degré de carbonification ou différentes.



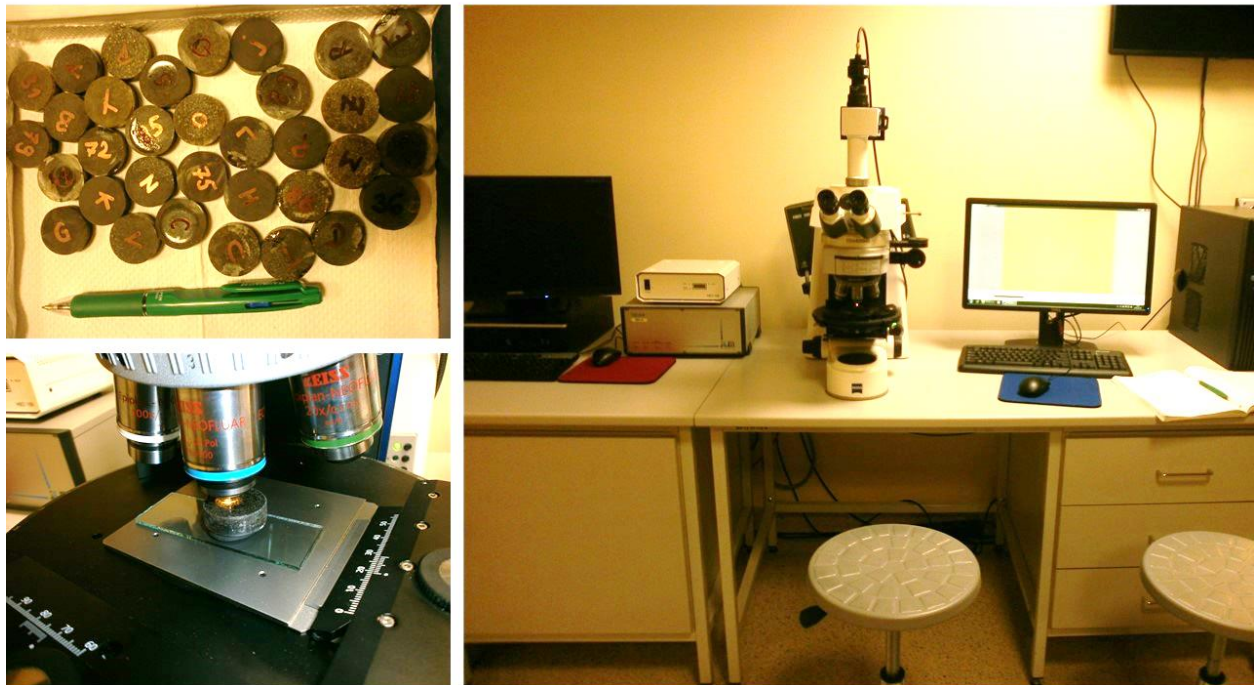
Les méthodes microscopiques peuvent aussi indiquer si d'autres matériaux sont également présents, par exemple particules provenant des processus de combustion ou des particules oxydées.

Nous avons examiné les caractéristiques susmentionnées en haut de la matière charbonnière et des matières organiques et inorganiques associées dans le Laboratoire de pétrologie organique de l'Université de Silésie à Katowice, Faculté des sciences de la Terre, en utilisant des échantillons de sédiments prélevés dans les lits des rivières du bassin versant de la Jiu. Les analyses ont été effectuées selon les procédures standard du Main Research Laboratory Ltd. de Jastrzębie Zdrój (Pologne).

#### **8.3.5.2. Protocole et techniques de mesure**

Les analyses pétrographiques effectuées sur des particules ont supposé la détermination de la composition macérale et des mesures aléatoires de réflectance.

*La composition macérale* a été déterminée par comptage ponctuel à 500 points et par mesures de réflectance aléatoires à 100 points sur chaque échantillon. Les analyses macérales ont été effectuées à l'aide d'un microscope Axioplan II (**Figure VIII.19**) en lumière réfléchie et immersion dans l'huile à un grossissement de 500× en suivant les procédures décrites dans [Taylor et al. \(1998\)](#) et dans [l'ISO 7404-3 \(1994\)](#). Cette catégorie d'analyse suppose plusieurs méthodes d'analyse de laboratoire et statistique des signaux spectro-colorimétriques en visible et infrarouge des sédiments contenant des traces de houille et de lignite.



**Figure VIII.19.** Les instruments de travail de la pétrologie organique

Le traçage sédimentaire par les méthodes de « fingerprinting » implique la discrimination des sources de sédiments en fonction des différences dans les propriétés optiques des éléments constitutifs. Ces propriétés optiques (en visible ou infrarouge) sont obtenues en se basant sur l'analyse des échantillons de différents types de charbon brut extraites de deux des zones-source principales des sédiments dans les rivières, ainsi que sur l'analyse des sédiments fluviaux contenant du charbon. La teneur en macéraux et d'autres formes comme les particules oxydées, les matières organiques imbrûlées provenant de la combustion, ont été déterminées, décrites et quantifiées à l'aide du compteur ponctuel James Swift ainsi qu'à travers du contenu des formes organiques. L'analyse pétrographique suppose à scanner automatique une surface, en comptant de manière supervisée chaque apparition d'une particule appartenant à une des catégories initialement établies. L'appareil d'analyse pétrographique traverse successivement les différents pixels de la matrice et l'utilisateur détermine visuellement de façon experte à quelle classe de particules le pixel appartient. La grille de l'échantillon est divisée en 500 pixels, qui représentent le nombre de déterminations standard qu'on doit faire en pétrologie. La **Figure VIII.20** précise les notions et les composants de la pétrologie du charbon.

Macerals: huminite/vitrinite		Macerals: inertinite	Liptinite
<b>Huminite macerals</b>	<b>Vitrinite macerals</b>	Fusinite	Sporinite
Telohuminite	Telovitrinite	Semifusinite	Cutinite
Textinite	Telinite	Secretinite	Resinite
Ulminite	Collotelinite	Macrinite	Exsudatinite
Detrohuminite	Detrovitrinite	Micrinite	Suberinite
Attrinite	Vitrodetrinite	Funginite	Alginite
Densinite	Collodetrinite	Inertodetrinite	Liptodetrinite
Gelohuminite	Gelovitrinite		
Corpohuminite	Corpogelinite		
Gelinite	Gelinite		

**Figure VIII.20.** Les composants de la pétrologie du charbon

On a cherché à déterminer le pourcentage de particules de 4 groupes et 6 sous-groupes, comme suit:

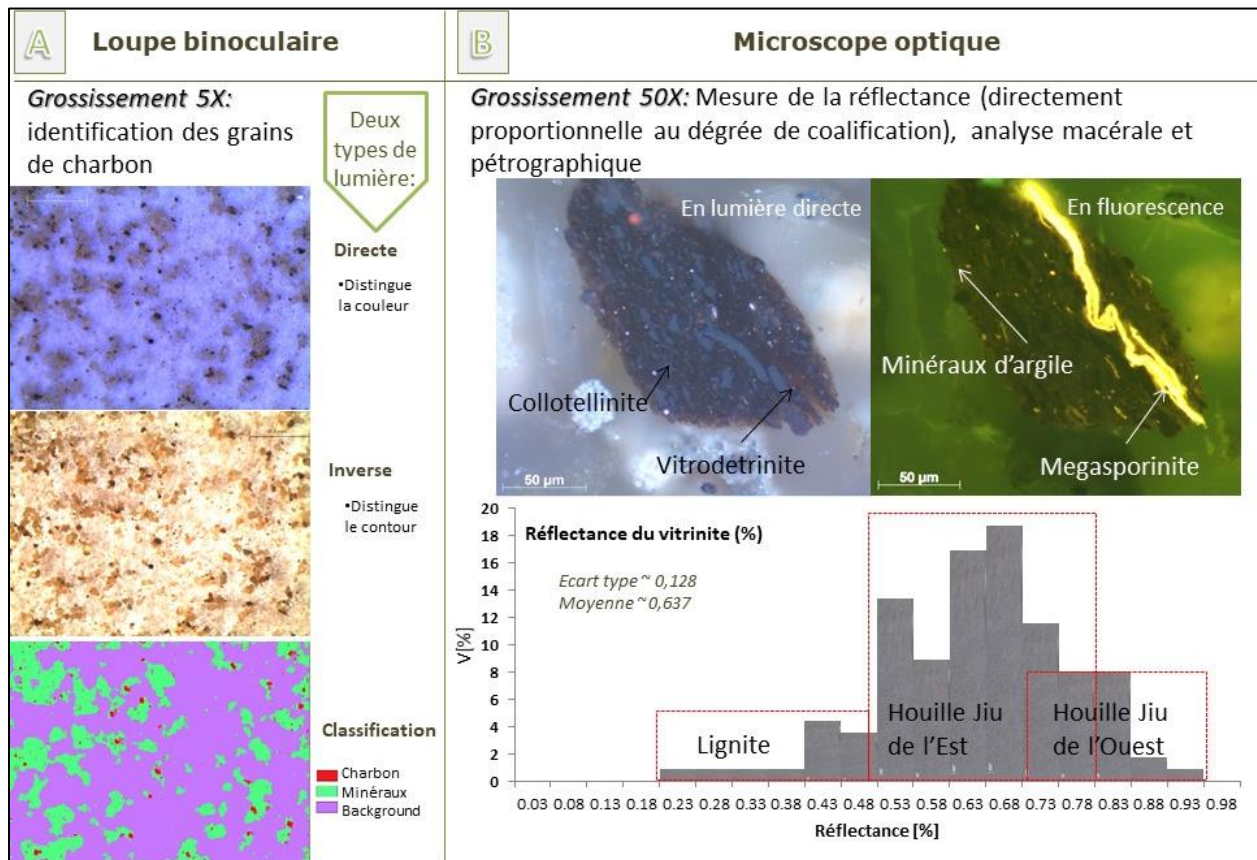
- **Le lignite** (avec les sous-groupes Huminite, Liptinite, Inertinite) ;
- **La houille** (avec les sous-groupes Vitrinite, Liptinite, Inertinite) ;
- **La matière organique altérée**<sup>43</sup> ;
- **Les minéraux inorganiques.**

*Les mesures de réflectance* ont été effectuées sur des 100 points des macéraux de huminite et vitrinite de chaque échantillon [ISO 7404-5, 1994; Taylor *et al.*, 1998]. Pour la calibration, un standard

<sup>43</sup> En anglais, cette catégorie est connue sous le nom de « chars »

isotrope de 0,898% de réflectance dans l'huile a été utilisé. Les échantillons de sédiments et de charbon prélevés dans les lits des rivières et des zones sources de charbon ont été examinés à l'aide d'un microscope Zeiss Axioplan2 réfléchissant la lumière à un grossissement de 500X, et équipé des objectives pour l'huile d'immersion. La réflectance a été mesurée sur des macéraux de vitrinite pour déterminer le degré d'houillification des particules organiques en utilisant des étalons pertinents pour le matériau étudié. Pour chaque échantillon de sédiment et de charbon, des microphotographies montrant les macéraux ont été prises. Tous les examens ont été effectués selon les normes [ICCP, 1998; ICCP, 2009].

Les deux analyses (pétrographique et de réflectance) comportent certaines incertitudes. Un œil entraîné pourrait correctement identifier et compter les différentes formes de macéraux sortant des échantillons de sédiments analysés au microscope ou sous le comptoir. La pétrologie nous permet ainsi de voir ce qui contient un grain de charbon qu'on a reconnu dans la classification d'image (*Figure VIII.21*).



**Figure VIII.21.** Ce qu'on peut voir à travers de l'analyse d'image et ce qu'on peut (mieux) voir à travers l'analyse pétrographique (Anticipation des résultats)

Au contraire, un utilisateur inexpérimenté risque de confondre les macéraux et l'analyse finale manquera de précision. Il y a peu de chance de comparer les échantillons entre eux, car ce sont des échantillons environnementaux de sédiments mélangés à des particules de charbon, soumis à des processus

hydrologiques durant le transport à travers le bassin versant et le long des rivières. Ainsi, même si nous formulons des hypothèses sur l'origine de la matière organique d'un échantillon, en nous basant sur les résultats d'un échantillon de sédiment/ charbon prélevé en amont, l'analyse reste subjective car elle n'utilise que des techniques de reconnaissance oculaire et non d'empreintes géochimiques.

### **8.3.5.3. Avantages et inconvénients**

Grâce aux techniques de la pétrologie organique, il est possible de connaître les constituants microscopiques dans la composition du charbon des échantillons de sédiments. Étant donnée l'existence de deux espèces de charbon dans les zones sources des sédiments traversées dans le bassin de la Jiu, la pétrologie organique permet de quantifier la proportion de chacun d'entre eux dans un échantillon de sédiment donné.

En utilisant le compteur de points, il est possible de mesurer le contenu de matière organique des échantillons de sédiments et aussi de créer sa propre classification de la matière organique / inorganique formant le sédiment. Les outils spécifiques à l'analyse de pétrologie organique permettent non seulement la quantification de différents types de matière organique, mais aussi la visualisation de macéraux et d'autres artefacts organiques, tels que les cendres des ménages et de la combustion industrielle.

Pour une fois, c'est une méthode qui nous permet de reconnaître à l'œil les différentes origines des particules composant l'échantillon de sédiment analysé, mais elle requiert en même temps une expérience de l'utilisateur dans l'analyse des divers types de charbon.

L'un des plus grands inconvénients des analyses de pétrologie organique concerne la durée et le fait que ce n'est pas forcément économique, car elles nécessitent un laboratoire bien équipé avec des microscopes de différents oculaires, des compteurs de points et un programme informatique pour calculer la réflectance. De plus, le coût de préparation des disques de sédiment/ charbon à analyser sous l'oculaire n'est pas négligeable et la technique n'est pas pratique pour tous. C'est pourquoi les échantillons doivent être envoyés à l'avance dans un laboratoire spécialisé dans ce domaine, car il s'agit d'un procédé de préparation des échantillons qui peut s'avérer long et très fatigant.

## **8.3.6. Méthodes géochimiques**

### **8.3.6.1. Le carbone total**

Une façon de déterminer la teneur en matière organique dans les sédiments des rivières est l'analyse élémentaire. Ce type d'approche est d'une grande importance écologique et peut apporter beaucoup d'informations sur les activités humaines, en particulier sur les engrais utilisés en agriculture, qui affectent l'environnement fluvial et modifient indirectement la composition des sédiments fins [Schimel, 1995 ; Angelo, 2010 ; Wang *et al.*, 2013]. Pour ce faire, nous avons analysé le rapport carbone sur azote (rapport



C/N), méthode utilisée principalement dans les environnements marins et lacustres comme substituts de la recherche paléoclimatique ou dans des bassins versants agricoles, pour étudier les conditions de croissance des plantes, les bio-fertilisateurs et les facteurs limitants pour les plantes [Prahl *et al.*, 1994; Gruber et Sarmiento, 1997]. Cette analyse fournit un rapport entre la masse du carbone et celle de l'azote dans l'échantillon, vus dans leur proportion l'un par rapport à l'autre, mais pas la quantité de chaque constituant [JoVE Science Education Database, 2019]. Dans l'hydrologie des bassins versants et la dynamique des flux hydro-sédimentaires, le rapport C/N peut être utilisé comme indicateur de l'origine des sédiments liés aux petits sous-bassins où l'agriculture est l'activité prédominante, influençant ainsi la matière organique lavée en surface ou infiltrée dans le système phréatique et ensuite contribuant à l'enrichissement des sédiments de la rivière en matière organique [Boehm *et al.*, 2002 ; Sun *et al.*, 2017 ; Zou *et al.*, 2019].

Des applications utiles pourraient également émerger des études sur la composition des sédiments caractérisant leurs sources en ce qui concerne des processus induits par l'homme, tels que l'érosion et la dénudation dans les champs agricoles (abondance d'azote) ou les cycles biogéochimiques liés aux processus générateurs de sédiments (lorsque le carbone et les carbonates sont abondants) [Gruber *et al.*, 2008].

L'analyse du rapport carbone/ azote a été réalisée dans le laboratoire d'Ecologie Alpine de l'Université Grenoble Alpes (LECA). Elle nous a permis d'acquérir une première connaissance sur les apports de carbone par l'érosion principalement et par les activités humaines (exploitation du charbon) en secondaire. Les résultats obtenus qu'on va présenter dans le chapitre §8.3., ont été complétés par les analyses de spéciation de charbon (§8.2.5.).

### Protocole de mesure

La détermination du contenu total du carbone dans les sédiments avec l'analyse élémentaire du rapport C/N a été faite par la méthode « *Flash Dynamic Combustion* » avec l'appareil FlashEA 1112., dont le principe de fonctionnement implique une combustion complète de l'échantillon dans un réacteur à haute température (environ 1800°C) jusqu'à l'oxydation complète [JoVE Science Education Database, 2019]. Les produits de combustion de la colonne de chromatographie sont ensuite réduits en N<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> et identifiés avec un détecteur de conductivité thermique.

Pour la préparation des échantillons de sédiments, 4 étapes principales ont été suivies (**Figure VIII.22**):

1. *Séchage (I)* – le premier séchage a été réalisé à 105 °C dans un four et il permet d'éliminer l'eau prélevé en même temps que la matière solide ;

2. *Broyage et tamisage* - le sédiment a été ensuite passé à travers un tamis de 63 µm ;

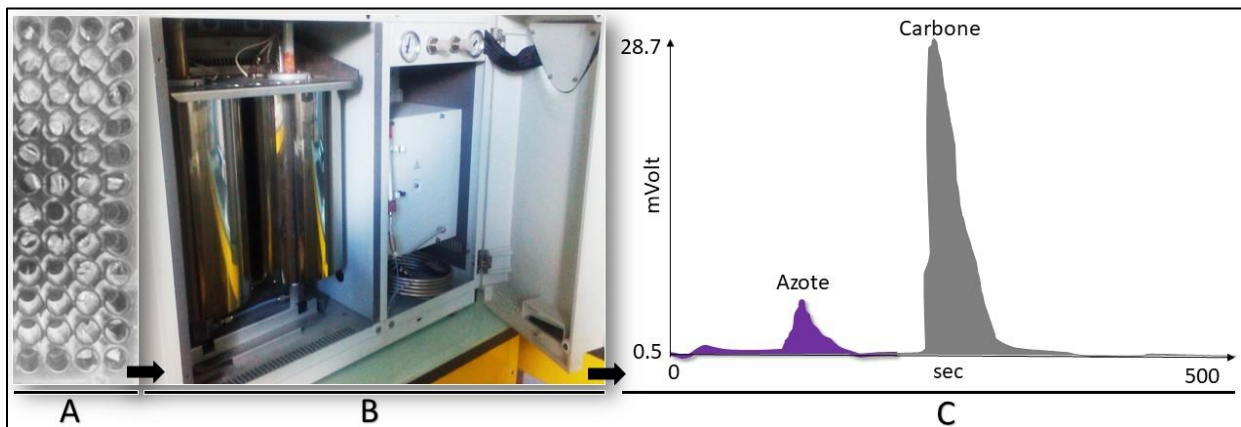


3. *Séchage* (II) - avant de soumettre les échantillons à l'analyseur, une deuxième exposition à une température de 60 °C pendant 48h a été nécessaire pour éliminer toute l'humidité atmosphérique qui aurait pu affecter l'analyse ;



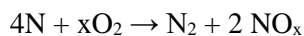
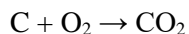
**Figure VIII.22.** Etapes de préparation des échantillons pour l'analyse en carbone totale

4. *Conditionnement* - chaque échantillon de sédiment a été placé dans des capsules en fer blanc contenant environ 5 mg, qui ont été ensuite introduites dans l'analyseur élémentaire sur un plateau à échantillons (**Figure VIII.23.A**).

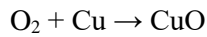
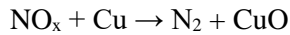


**Figure VIII.23.** Etapes de préparation et d'analyse de la proportion de N et C des échantillons. **A.** Les capsules de 5 mg sur le plateau à échantillons ; **B.** Le réacteur d'oxydation ; **C.** La courbe standard des pics d'azote et carbone à la base du calcul des %N et %C

Après la phase préparatoire, les échantillons de sédiments ont été placés sur un disque en étain et déposés dans le réacteur d'oxydation via un échantillonneur automatique où ils sont brûlés dans un environnement contenant de l'oxygène à plus de 900°C en présence d'un catalyseur d'oxydation (**Figure VIII.23.B**). Le principe de la manipulation suppose que le carbone de l'échantillon soit converti en dioxyde de carbone et l'azote converti en azote gazeux et en certains oxydes d'azote, comme suit :



Ensuite, l'hélium gazeux transporte ces produits dans un second tube de réaction rempli de cuivre qui réduit les oxydes d'azote en azote gazeux et élimine l'oxygène en excès (ceci est complété à 680°C) :



Le flux de gaz traverse ensuite un filtre rempli de perchlorate de magnésium pour éliminer toute vapeur d'eau avant que le flux n'atteigne la colonne de chromatographie en phase gazeuse.

Le N<sub>2</sub> quittera la colonne de chromatographie en phase gazeuse en 110s environ, puis le CO<sub>2</sub> en 190s environ [JoVE Science Education Database, 2019]. En utilisant une courbe standard créée avec de l'acide aspartique, les proportions de N et C de l'échantillon peuvent être déterminés. Un chromatogramme est produit pour chaque échantillon et indique la quantité d'azote et de carbone dans l'échantillon. Les aires sous la courbe à chacun des pics du chromatogramme de l'échantillon sont comparées aux courbes standard et la quantité d'azote et de carbone dans l'échantillon est calculée. Sur la base du poids de l'échantillon d'origine, les proportions de N et C sont calculées (*Figure VIII.23.C*).

### Avantages et inconvénients

L'analyse du rapport C/N est rapide et elle peut être utilisée pour différents domaines d'intérêt (pour des sédiments géologiques, fluviaux ou prélevés des terrains agricoles). Une quantité infime de quelques grammes de sédiment est nécessaire pour déterminer le rapport C/N dans un échantillon donné. La méthode permet de déterminer le rapport C/N, même quand ces deux constituants sont en très petite quantité dans l'échantillon, de l'ordre de 100 ppm. Le travail se fait dans des conditions respectueuses de l'environnement, contrairement d'autres méthodes de détermination de l'azote total plus polluantes (la technique de combustion éclair n'utilise pas de produits chimiques toxiques).

Cependant, les coûts de l'analyse de laboratoire peuvent être élevés, et ils s'ajoutent au coût d'acquisition et de maintenance de l'analyseur. En ce qui concerne les résultats, la méthode ne permet pas de distinguer le charbon des autres formes (organiques/ inorganiques) de carbone, ni de discriminer les différentes origines du carbone. Du moins permet-elle la détermination exacte des sources de carbone.

A cause du broyage appliqué dans la phase initiale de préparation de l'échantillon et en n'analysant que les sédiments fins au-dessous de 63 µm, nous éliminons éventuellement une partie des sources sédimentaires plus grossières (voir le schéma de la granulométrie vs. C/N de §8.3.).

#### 8.3.6.2. Spéciation houille-lignite

##### Principe de mesure

Dans notre zone d'étude, l'existence du charbon et son exploitation ont été rapportés dans plusieurs études scientifiques comme une source pour la formation des sédiments fins [Rădoane *et al.*, 1995; Savin,

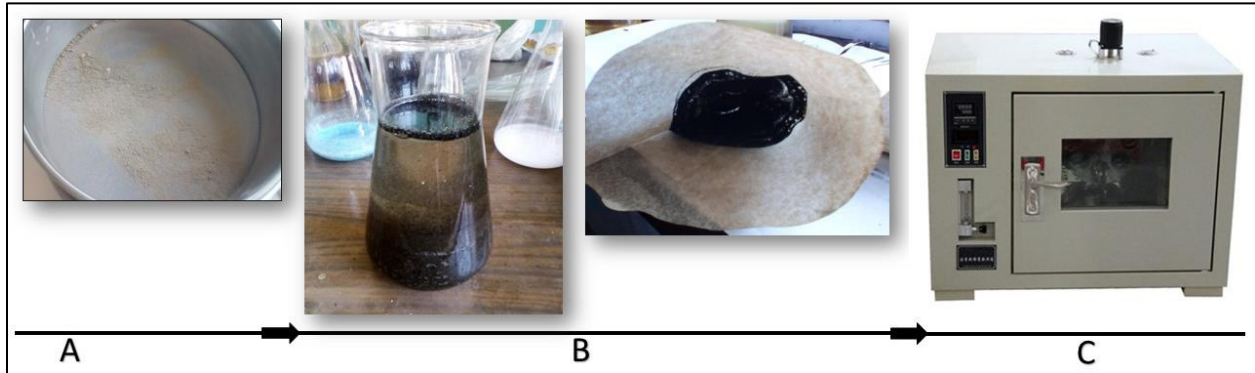
2004]. Selon la classification officielle des charbons [[Standard Classification of Coals – ASTM International D388](#)], les espèces de charbon qui se trouvent dans la zone d'étude sont *le lignite* (dans le bassin de Motru-Rovinari) et *la houille* (dans la dépression de Petroșani). Sachant que les sédiments du bassin de la rivière Jiu, en aval des deux bassins charbonniers (Petroșani et Motru - Rovinari) ont une teneur en carbone différente, une étape importante dans l'identification des sources sédimentaires a été la caractérisation de cet héritage sédimentaire en tant que traceur. Ainsi, l'objectif principal de cette méthode est la quantification de la contribution des zones carbonifères dans la genèse, le transport et le dépôt des sédiments fins dans le lit de la rivière, afin de mieux comprendre la dynamique hydro-sédimentaire dans le bassin de la rivière Jiu.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les étapes suivies pour préparer les échantillons et déterminer le contenu de charbon. Nous avons utilisé pour cette analyse 31 échantillons de sédiments collectés des lits des rivières et les 11 échantillons des couches alluviales découvertes dans la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari.

Dans une première étape, après le séchage à 105°C, le broyage et la pesée des échantillons, seules des fractions inférieures à 1 mm ont été retenues pour l'analyse. Le principe de spéciation du charbon au moyen de la densité apparente implique la séparation des particules de charbon à l'aide d'un liquide de densité égale à celle des espèces de charbon cibles. La totalité du charbon a été isolée en introduisant dans un récipient contenant l'échantillon de sédiment, un liquide de densité de 1,7 g/l obtenu en diluant le bromoforme (CHBr<sub>3</sub>), un liquide de densité élevée (de 2,28 g/l) avec de l'hexane (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>), de faible densité (0,7 g/l). Une fois que la totalité de la masse de charbon a été séparée par flottement, la deuxième procédure de séparation des deux espèces de houille et de lignite a été faite. En partant du principe que le lignite (densité 1,4 g/l) est plus léger que la houille (1,7 g/l), un second liquide de densité de 1,4 g/l a été préparé en diluant davantage le bromoforme avec l'hexane. De cette manière, les deux espèces de charbon ont été séparées.

Afin de peser la quantité des deux espèces de charbon, la matière a été laissée à sécher sur le papier filtre. Les spécimens dont la teneur totale en houille a dépassé 3 g ont été utilisés dans une analyse d'élimination des matières volatiles afin de déterminer la proportion de houille provenant de la Jiu orientale et occidentale. Il est connu que le charbon exploité du bassin de la Jiu de l'Est (les mines de Lonea, Petrila) est de qualité inférieure à celle du bassin minier de la Jiu de l'Ouest (les mines de Iscroni, Vulcan, Aninoasa) et que la différence est faite par la quantité de matière volatile plus grande dans le secteur oriental [[Preda, 1994](#)]. Afin de distinguer les sources de charbon bitumineux de la Jiu de l'Ouest de ceux provenant de la Jiu de l'Est, les composés volatiles des échantillons de plus de 3g ont été déterminés par calcination en l'absence d'air (creuset coiffé) à 959 ° C [[ISO 562: 2010](#)] et la teneur en cendres par calcination à 850°C [[ISO 1171: 2010](#)]. En connaissant le rapport des taux de matières volatiles théoriques entre les deux bassins

de houille, il a été finalement possible de distinguer les trois sources de charbon du bassin de la rivière Jiu : le lignite du bassin Motru – Rovinari, la houille de qualité supérieure de la Jiu de l'Ouest et la houille de qualité inférieure de la Jiu de l'Est. Les étapes de la spéciation des formes de charbon sont présentées dans la **Figure VIII.24**.



**Figure VIII.24.** Etapes de la spéciation des formes de charbon: **A.** Tri granulométrique des échantillons bruts de diamètre <1mm ; **B.** La séparation par densité -> houille – lignite – autres minéraux ; **C.** Sur les résidus de houille / four 850°C (calcination) / élimination de la matière volatile, afin de distinguer différents types de houille: Jiu de l'est, Jiu de l'Ouest

#### Avantages et inconvénients

L'approche géochimique de spéciation du charbon par l'analyse de la densité apparente est une méthode très efficace pour séparer le charbon du reste de sédiments d'un échantillon et ensuite séparer les différentes espèces de charbon en fonction de la différence de densité.

Cependant, si dans un bassin hydrographique se trouvent plusieurs espèces de charbon sans aucune différence de quantité de matières volatiles au sein d'une même espèce, comme dans notre cas, il n'est pas possible d'interpréter l'origine de cette teneur générale en charbon comme la source exacte de sédiments. En termes de coût et de difficulté d'exécution, la méthode n'est pas très exigeante, mais l'utilisation des deux fluides (le bromoforme et l'hexane), est toxique et suppose une protection supplémentaire par le port d'une masque anti-gaz. De plus, dans l'étape de la séparation du charbon dans la solution, puis de séchage des filtres sur lesquels il est déposé, du aux produits de réaction dégagés, il est nécessaire d'assurer une bonne ventilation du laboratoire.

#### 8.3.6.3. Métaux lourds et lanthanides

##### Historique de l'approche

Toute matière alluvionnaire, qu'elle soit originaire des roches métamorphiques, magmatiques, ou bien sédimentaires, contient des quantités faibles mais précieuses de métaux lourds et lanthanides [Baedecker, 1987]. Bien que de nombreuses études toxicologiques et environnementales portant sur la pollution dans les milieux fluviaux, marins, urbains, etc, les minéraux lourds sont de plus en plus utilisés

en science fondamentale aussi et de cette façon ils sont utilisés à d'autres fins. Par exemple, ils peuvent être considérés comme des traceurs importants dans l'analyse de la dynamique sédimentaire, leur apparition dans l'environnement étant liée à certains types de roches. Ainsi, si la géologie des zones sources potentielles de sédiments est connue, les minéraux lourds et les lanthanides peuvent être utilisés avec succès dans le traçage des flux hydro-sédimentaires.

Les métaux lourds sont généralement définis comme des métaux ayant des densités, des poids ou des nombres atomiques relativement élevés. Dans le tableau périodique, les métaux lourds se trouvent dans l'intervalle des positions 21 à 93, à quelques exceptions : 5/6 métalloïdes (32 – 34 et 51 – 52), 2/4 halogènes et 2/6 gas nobles (alternativement sur 35 – 35 et 53 – 54) et 57 (group des lanthanides, avec les positions 58 – 71, situées plus bas dans le tableau). Il ne faut pas confondre les métaux ou minéraux lourds avec les métalloïdes, qui ont des caractéristiques entre celles des métaux et des non-métaux [Goldschmidt, 1982].

Il n'existe pas de définition largement acceptée du métal lourd sur la base de critères. Différentes significations peuvent être attachées au terme, selon le contexte. En métallurgie, par exemple, un métal lourd peut être défini sur la base de la densité [Morris, 1992], alors qu'en physique, le critère de distinction peut être le numéro atomique [Gorbachev *et al.*, 1980] et un chimiste se préoccuperait probablement davantage du comportement chimique [Hawkes, 1997].

L'existence des lanthanides a été révélée pour la première fois en 1787 à Ytterby, en Suède, lorsqu'un minéral noir inhabituel a été découvert grâce à ses propriétés chimiques, optiques et magnétiques spécifiques résultant de la structure électronique particulière [Bünzli, 2013]. Ce minéral, maintenant connu sous le nom de « gadolinite », a ensuite été séparé en différents éléments lanthanides. Ces éléments ont d'abord été classés comme « terres rares » en raison du fait qu'ils étaient obtenus avec des minéraux raisonnablement rares, même si les éléments des lanthanides ont une abondance pratiquement illimitée [IUPAC, 2018]. Le terme « lanthanides » a été adopté, selon le premier élément de la série *Lanthanum* [Pourjavid *et al.*, 2009].

Les lanthanides sont dispersés de manière isomorphe dans le réseau cristallin des principales roches basiques telles que les plagioclases, amphibolites et pyroxènes [Spacu, 1984]. Le contenu des terres rares des roches basiques et ultrabasiques peut varier largement. Il est minimal dans le pyroxène, le dunite et le péridotite (0,14 ppm - 1,07 ppm) et atteint des valeurs plus élevées dans le basalte (357 ppm), le kimberlite (440 ppm) et le granofire (702 ppm). L'estimation de l'abondance des éléments de terres rares dans la croûte terrestre a été initiée par Clark en 1924 et a été continuée depuis par différents chercheurs. Même de nos jours, l'information est encore mise à jour en permanence par l'accumulation de nouvelles données et techniques d'analyse [Ilie, 1987].

\*\*\*



Le but de ce sous-chapitre a été d'analyser la composition chimique des échantillons de sédiments récoltés en termes de composition chimique, particulièrement en ce qui concerne la teneur en éléments rares qui pourraient se constituer dans des véritables traceurs pour l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire.

Dans notre approche, les questions de recherche ont été les suivantes :

- Quels sont les minéraux lourds qui pourraient être considérés comme des marqueurs géochimiques dans les sédiments fins de la rivière Jiu?

- Ces métaux lourds proviennent-ils exclusivement des zones minières ou d'autres zones sources de formation ?

- La présence de minéraux lourds dans les sédiments fluviaux est-elle associée à des processus naturels ou plutôt anthropiques ?

La détermination de la teneur en métaux lourds et lanthanides pourrait nous aider à identifier l'origine des sédiments fluviaux. La motivation pour choisir cette méthode géochimique est basée sur deux arguments.

Le premier argument concerne l'avantage de la décomposition d'un échantillon de sédiment en éléments constitutifs. Il est à noter que la méthode géochimique ne fonctionne qu'avec la fraction lourde de l'échantillon (comme nous le verrons dans la section §8.3.4.7.3.). En plus, seuls certains minéraux peuvent exister à des densités aussi élevées, les autres étant déjà toutes éliminés avec la fraction intermédiaire (masse volumique comprise entre 1,7 et 2,8 g / l) ou étant d'intérêt pour la spéciation du charbon (les deux fractions fines correspondant à des masses volumiques inférieures à 1,7 g / l). Les éléments chimiques et les minéraux qu'ils forment, spécifiques à cette fraction lourde, se trouvent dans le tableau périodique de *l'Annexe 14*, à contour bleu, dans les groupes Au, Zr, Ti, As, Sr et lanthanides. Ces derniers bénéficient également d'une section spéciale du tableau périodique, à savoir l'avant-dernière rangée de Lanthanides, ou terres rares, comme on les appelle (Ce, Pr, Nd, Gd, Lu, etc.).

Le deuxième argument, concernant l'échelle spatiale à laquelle on travaille, préconise une meilleure identification de la source précise des sédiments en utilisant les minéraux lourds et les lanthanides. Bien qu'elle ne puisse pas remplacer une analyse hydrologique basée sur l'étude au niveau des sous-bassins hydrographiques (comme tenté au chapitre 7 du présent travail), l'origine de certains éléments lourds pourrait aider à compléter et identifier les sources potentielles de sédiments.

Les deux groupes d'éléments analysés, les minéraux lourds et les lanthanides, ont été déterminés par spectroscopie à fluorescence X, méthode que nous détaillerons ci-dessous, après un bref historique dans ce domaine de recherche.

## Protocole de travail

Dans cette analyse aussi, nous avons utilisé les deux types d'échantillons de sédiments fluviaux. Sur le total des échantillons prélevés du bassin de la rivière Jiu, seuls 35 ont été utilisés à ce stade : 11 échantillons du dépôt alluvial vertical de Podari et 24 échantillons des lits de la rivière Jiu et de ses affluents, choisis de façon à bien couvrir les zones sources de sédiments potentielles. La procédure de prélèvement et de prétraitement des échantillons a été détaillée dans les chapitres précédents et coïncide en grande partie avec celle envisagée pour d'autres analyses en laboratoire telles que la colorimétrie, la pétrologie organique, la détermination de la teneur en charbon.

Les analyses ont été réalisées dans le Laboratoire de Géochimie de la Faculté des Mines, de l'Université de Petroșani. Afin d'effectuer l'analyse géochimique portant sur la teneur en minéraux lourds, les échantillons ont d'abord été séchés au four (durant environ 24 h à 105°C). Le matériel résulté a ensuite été concassé et tamisé pour éliminer les particules supérieures à 1 mm. Sur la masse totale de l'échantillon, la fraction d'une densité supérieure à 2,8 g/l a porté intérêt et a été isolée en ajoutant du bromoforme dans le bécher de l'échantillon. La partie du sédiment de densité inférieure à 2,8 g/l flottante à la surface du liquide a été enlevée, car ce qui était déposé au fond du récipient devait être décanté sur papier filtre et séché à l'étuve.

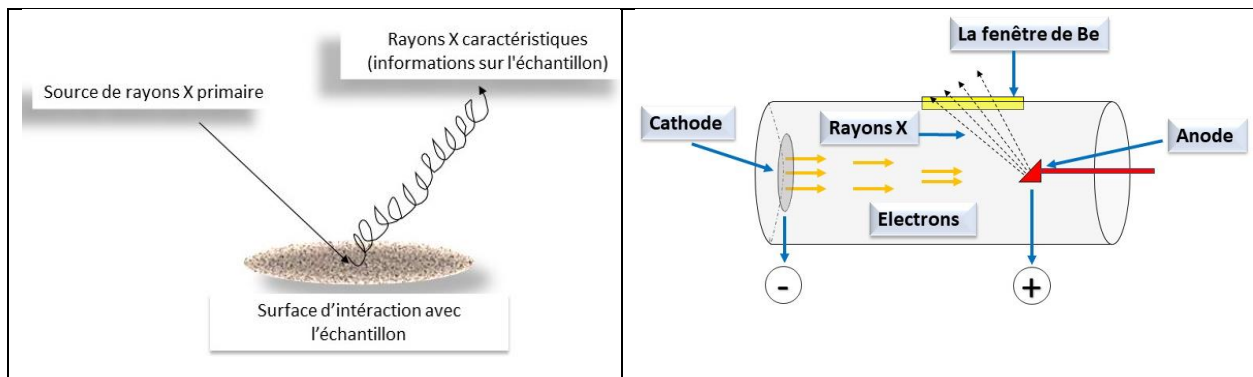
Les analyses élémentaires ont été effectuées par spectrométrie à fluorescence X (FRX) [SR EN 15309: 2007]. Au total, environ 30 minéraux lourds et 8 lanthanides et terres rares ont été déterminés, qui ont été analysés statistiquement et interprétés du point de vue des sources possibles et des relations géochimiques entre eux, comme nous le verrons au chapitre §8.3. Le nom de l'échantillon, le spectre et la composition élémentaire ont été stockés dans une bibliothèque dédiée. À l'aide d'un étalonnage interne, l'appareil calcule automatiquement les concentrations d'environ 30 traceurs géochimiques ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ , V,  $MnO$ ,  $Fe_2O_3$ , Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr, etc) déterminés par spectrographie de fluorescence à rayons X Rigaku Supermini. Les concentrations des éléments les plus pertinents ont ensuite été retenues pour l'analyse statistique.

## Principe de la méthode d'analyse par spectroscopie à fluorescence X

La spectroscopie FRX reste une méthode classique d'investigation géochimique des compositions minérales et chimiques de la Terre [Temitope et Oyedutun, 2018]. Elle est largement utilisée pour la détermination qualitative et quantitative de la composition chimique élémentaire d'un échantillon [Beckhoff *et al.*, 2006 ; Bertin, 1970]. Ses premières applications ont été utilisées dans l'industrie, mais les sciences de l'environnement ont également de plus en plus besoin de caractériser la composition des sédiments par une telle méthode.

La spectroscopie par fluorescence X (FRX) est l'une des méthodes d'estimation systématique de la composition géochimique des roches, des sédiments et des échantillons de matériaux terrestres la plus largement utilisée [Kramar, 1997; Ling *et al.*, 2017; Wang et Wang, 2017; Tolosana-Delgado et McKinley, 2016]. Pendant de nombreuses années, la spectrométrie FRX a été utilisée dans la détermination des concentrations géochimiques sur des échantillons géologiques, archéologiques et industriels [Jenkins *et al.*, 1995; Young *et al.*, 2016 ; Weltje et Tjallingii, 2008; Jalali et Jalali, 2016; Jenkins *et al.*, 1995; Kramar, 1997].

La spectrométrie de fluorescence X (FRX) est une technique bien connue, bien établie et largement appliquée dans la détermination de nombreuses compositions élémentaires majeures de matériaux terrestres [Temitope et Oyedutun, 2018]. Le principe d'une mesure FRX consiste à émettre des rayons X à une énergie comprise entre 5 et 100 kV à partir d'une source (souvent un tube à rayons X). L'énergie dirigée vers l'échantillon analysé s'appelle *Radiation X Primaire*. Les *Rayons X caractéristiques*, à leur tour, sont spécifiques aux éléments de l'échantillon qui les réémet. Ces radiations caractéristiques quittant l'échantillon contiennent des informations permettant de déterminer la composition chimique du matériau (solide ou en solution). La **Figure VIII.25.A** illustre le principe de la méthode FRX.

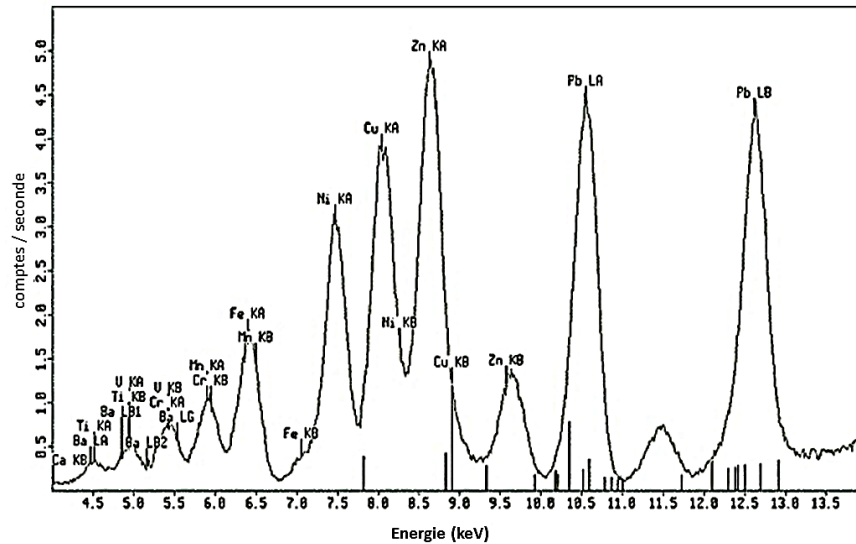


**Figure VIII.25. A.** Schéma du mode de génération du signal (rayons X caractéristiques) dans l'analyse FRX (Source : [Metallurgist](#)) et **B.** Description du fonctionnement du tube à rayons X (selon [Cârstea, 2012](#))

Le tube à rayons X fonctionne sur la base de l'accélération dans un champ d'électrons émis par la cathode à haute tension [Jenkins et de Vries, 1973]. En fonction de la nature de l'échantillon, un anticathode approprié est fabriqué - constitué d'un métal non échantillonné (Cu, Fe, Co, Ni, Cr, Mo, Ag, Rh, etc.). Les rayons X primaires sont émis dans toutes les directions, mais seuls ceux qui vont dans la direction de la fenêtre, en béryllium (Be), sortent du tube [Jenkins, 1978; Cârstea, 2012]. Le schéma d'un tel tube est représenté dans la **Figure VIII.25.B**.

Les rayons X quittant le tube sont de deux types : rayonnement de fond - à spectre large et rayonnement continu - recouvrant un spectre caractéristique du métal de l'anticathode [Jenkins, 1970 ; van Grieken et Marokwicz, 2002]. Les photons X, situés sur l'échantillon à analyser, provoquent des

rayonnements caractéristiques. Les rayons X primaires sortant du tube à rayons X sont ensuite dirigés sur l'échantillon à analyser, qui émette ce que l'on appelle le *rayonnement de fluorescence*, caractéristique des éléments de l'échantillon et s'accompagne d'un rayonnement continu à large spectre dû à l'interaction des électrons avec le champ électrique du noyau [Cârstea, 2012] – *Figure VIII.26*.



**Figure VIII.26.** Spectre typique émis par un tube à rayons X en molybdène (Source: [Machinery Lubrication](#))

### Avantages et inconvénients

La méthode de détermination de la teneur en métaux lourds et en lanthanides dans les sédiments permet d'obtenir une vue globale de la propagation des éléments rares provenant de différentes sources géologiques ou de certaines activités d'exploitation des agrégats minéraux, comme le charbon ou les métaux. Un grand avantage de cette méthode d'analyse est que les échantillons ne nécessitent pas de traitement chimique préalable.

Par rapport à la méthode précédente de détermination du contenu de charbon de différents degrés de carbonification, celle portant sur les métaux lourds et aux lanthanides permet d'analyser des échantillons solides de manière non destructive par rayonnement X. La technique FRX peut être facilement utilisée comme méthode quantitative d'analyse de la composition élémentaire, car la teneur maximale d'un élément est souvent liée à la concentration dans l'échantillon. Cependant, les interprétations sont assez difficiles et nécessitent des connaissances plus avancées en géochimie et une expérience pratique du terrain et de l'épandage de certains minéraux.

Les résultats de la méthode FRX peuvent être rapportés à la fois qualitativement et quantitativement et peuvent fournir des informations complémentaires à d'autres méthodes qui reposent sur l'abondance d'éléments chimiques plus courants, qui ne sont pas caractéristiques pour certaines sources sédimentaires

Bien que la méthode FRX présente de nombreux avantages, il convient de prendre en compte certains inconvénients avant de se lancer dans une étude utilisant cette technique. Premièrement, la plupart des instruments FRX sont assez limités dans leur capacité à mesurer avec précision l'abondance d'éléments géochimiques des matériaux terrestres naturels contenant des niveaux minimaux d'éléments, sans aucune forme de modification / d'étalonnage [Taggart *et al.*, 1987]. Deuxièmement, la plupart des variations élémentaires sont mesurées sous forme de comptage plutôt que sous forme de concentration. L'étalonnage des instruments FRX pour mesurer la concentration nécessite une analyse quantitative de la chimie des sédiments en vrac [Löwemark *et al.*, 2011; Jarvis, 2011].

La méthode implique des coûts moyens (pour l'appareil FRX et le bromoforme), mais les techniques de détermination des éléments d'intérêt sont destructives et l'échantillon ne peut pas être utilisé ultérieurement pour d'autres types d'analyses. Etant donné que l'isolement de sédiments lourds à l'aide de bromoforme est nocif pour la santé, le travail dans le laboratoire nécessite des mesures de protection telles que le port de masques anti-gaz.

\*\*\*

Dans les chapitres suivants (§9 et §10), une partie des méthodes présentés ici seront utilisées pour caractériser les couches de sédiments de la tranchée et pour l'analyse des sources de sédiments lors des crues les plus effectives en termes du dépôt des couches alluviales.



## Chapitre 9.

### Résultats des analyses sur les sédiments de la tranchée

<b>9.1. La succession des couches</b> .....	444
<b>9.1.1. Confirmation de la stratigraphie</b> .....	444
9.1.1.1. Epaisseur des couches.....	444
9.1.1.2. Couleur et colorimétrie.....	446
9.1.1.3. Contenu en charbon et en carbone totale.....	447
<b>9.1.2. Caractéristiques des couches</b> .....	448
9.1.2.1. La granulométrie .....	448
9.1.2.2. Colorimétrie.....	451
9.1.2.3. Contenu en charbon par espèces.....	455
9.1.2.4. Teneur en métaux lourds et lanthanides.....	456
<b>9.1.3. Synthèse des résultats. Mise en évidence des couches les plus cohérentes</b> .....	458
<b>9.1.4. Synthèse sur les méthodes utilisées pour l'analyse des sédiments déposés à Podari</b> .....	459
<b>9.2. Datation de la couche basale</b> .....	460
<b>9.2.1. Principes de la datation</b> .....	460
<b>9.2.2. Le site et le protocole d'échantillonnage</b> .....	464
<b>9.2.3. Le protocole de laboratoire</b> .....	468
9.2.3.1. Le choix du dosimètre et de la granulométrie.....	467
9.2.3.2. L'extraction des cristaux de quartz.....	468
9.2.3.3. La préparation des aliquotes.....	471
9.2.3.4. La détermination de la dose équivalente.....	471
<b>9.2.4. Résultats de la datation</b> .....	474
<b>9.2.5. Interprétation des résultats, conclusions et perspectives</b> .....	477

## 9.1. La succession des couches

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les différentes méthodes de laboratoire que nous venons de présenter en détail dans le chapitre §8.

Nous avons appliqué ces méthodes en deux étapes : 1) pour confirmer la stratigraphie et 2) pour dégager les caractères principaux de certaines des couches. Nous reviendrons à la fin de ce sous-chapitre avec une synthèse des méthodes d'analyse en ce qui concerne leur utilité et leur mise en œuvre.

### 9.1.1. Confirmation de la stratigraphie

La confirmation de la stratigraphie se fera à l'aide des différents paramètres issus des analyses de laboratoire, qui peuvent montrer des contrastes entre les couches de sédiments qu'on a décomposées visuellement sur le terrain sur l'ouverture des deux tranchées ( $T_{\text{amont}}$  et  $T_{\text{aval}}$ ) réalisées dans les berges de la rivière Jiu, comme présenté dans le §8.1.2.2. Nous rappelons que  $T_{\text{amont}}$  a été utilisé que pour tester quelques méthodes d'analyse mises en place pour étudier les couches de sédiments, alors que  $T_{\text{aval}}$  a servi pour des analyses plus détaillées afin d'identifier les sources des sédiments.

Par conséquent, tout ce qui tient des aspects physiques décrivant la tranchée principale finale,  $T_{\text{aval}}$ , se trouvant (comme précisé dans §8.1.2.2.) à presque 300 m aval de la station hydrométrique de Podari, sera présenté en miroir avec la tranchée initiale d'exploration ( $T_{\text{amont}}$ ).

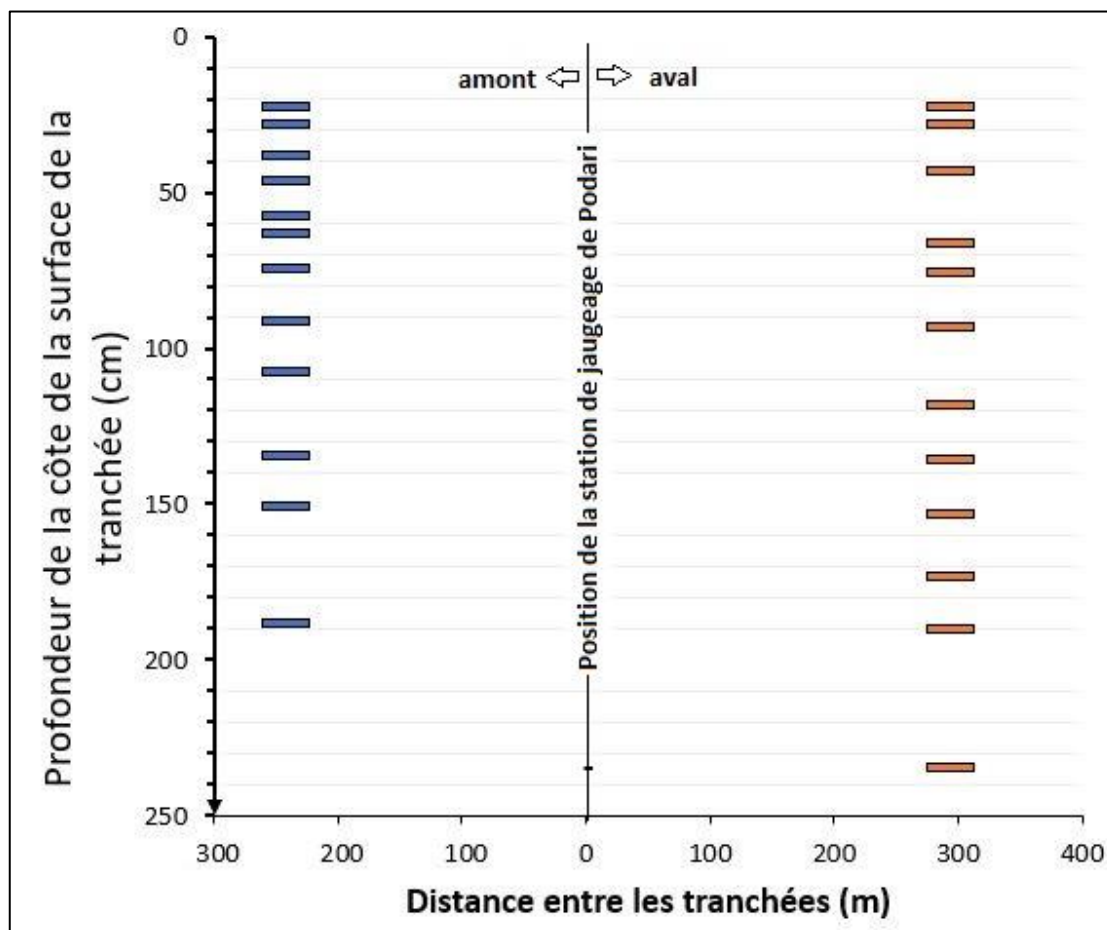
Les méthodes communes utilisées dans l'analyse des deux tranchées et la vérification de la stratigraphie ont été les suivantes : la vérification de l'épaisseur et du nombre des couches, le contraste entre les couches plus claires et plus sombres, vu à l'œil et à travers des indicateurs spectro-colorimétriques et le contenu total de charbon et de carbone. Nous allons ensuite présenter les variations de ces paramètres entre les deux tranchées.

#### 9.1.1.1. Epaisseur des couches

Afin de valider la stratigraphie du dépôt alluvial dans la section de Podari, les deux tranchées ont été utilisées pour comparer la profondeur à laquelle se trouvent leurs couches et les épaisseurs correspondantes. Pour simplifier les dénominations, notons le profil vertical de  $T_{\text{amont}}$  (qui sert pour l'exploration) du 26 février 2016 et  $T_{\text{aval}}$ , le profil vertical de 9 juin 2017 (qui sert de travail pour la suite), par rapport à la station hydrométrique de Podari.

Une première observation concerne le nombre de couches composant chacune des deux tranchées creusées sur les rives de la Jiu. Comme nous l'avons mentionné au début du chapitre §8.1, la délimitation des couches a été réalisée *in situ* par des mesures et observations principalement liées à leurs caractéristiques visuelles : granulométrie, couleur, lignes de rupture entre les couches, différences du degré d'humidité des deux strates voisines, ou l'état de conservation de l'épaisseur le long du plan horizontal.

Sans se fixer pour objectif *a priori* d'obtenir le même résultat dans les deux tranchées, nous avons identifié pour chacune des tranchées 11 couches de sédiments ( $P_1 - P_{11}$ ) d'une épaisseur moyenne comprise entre 10 et 20 cm (le minimum de 6 cm et le maximum de 27 cm), probablement étant déposées lors des mêmes crues (**Figure IX.1**).



**Figure IX.1.** Variation de l'épaisseur des couches des deux tranchées

Dans la *Figure IX.1* nous pouvons repérer la succession des couches identifiées sur les deux tranchées. Les strates sont notées dans leur ordre chronologique, de  $P_1$  (la plus ancienne) à  $P_{11}$  (la plus récente). La façon dont la carte est construite est telle que l'élévation de la surface est représentée au même niveau sur les deux tranchées et, en fonction de cela, la profondeur des bases de chaque couche qui constitue les deux dépôts d'alluvions diffère.

La profondeur maximale de la couche basale est différente, d'autant plus qu'à la tranchée  $T_{\text{amont}}$  il a été difficile de la découvrir. Si la tranchée  $T_{\text{aval}}$  a été creusée jusqu'à ce que nous ayons atteint le niveau de la nappe phréatique, pour assurer la connexion avec le niveau de la rivière, la tranchée  $T_{\text{amont}}$  n'a pas pu être creusée jusqu'à la surface libre de la rivière, car il se trouve dans une partie de la rive assez raide, posant le risque de glissement et d'effondrement de la berge. Cette incertitude sur la profondeur de la couche  $P_0$  à  $T_{\text{amont}}$  est représentée par une flèche double verticale sur le graphique. En fait, cette dernière couche (la 12<sup>e</sup>, ici notée  $P_0$ ) est probablement composée de plusieurs dépôts successifs, mais étant plus sombre, plus humide et plus hétérogène du point de vue colorimétrique et de la texture, il n'a pas été possible de délimiter ses subdivisions à haute précision. Par conséquent, nous nous sommes arrêtés à 11 couches que nous devons relier à 11 différentes crues (conformément à l'hypothèse formulée dans §6.3.2.). La formation de la couche basale (la plus ancienne) nous ne pouvons pas l'attribuer à un certain événement de crue.

Bien entendu, la cote du toit des tranchées n'est pas la même, en raison du fait qu'il existe une différence d'environ un demi-mètre d'altitude entre les deux tranchées et une pente d'environ 0,1% de la surface libre sur cette distance de 535 m entre  $T_{\text{amont}}$  et  $T_{\text{aval}}$ . Pour simplifier, nous avons toutefois représenté

la variation de la profondeur des couches en partant du même point "0" de la même côte de la surface de la tranchée (d'environ 70 m d'altitude). En comparant l'épaisseur des couches, nous remarquons que les deux premières ( $P_{10}$  et  $P_{11}$ ) sont similaires. Les couches suivantes (du milieu) ont des épaisseurs légèrement différentes, tandis que les couches  $P_3$  et  $P_4$  ont à nouveau presque les mêmes épaisseurs.

Sur la base de cette analyse, la délimitation des couches semble cohérente, car il y a une correspondance entre le nombre et l'épaisseur des couches aux deux tranchées. Les différences qui existent entre elles peuvent être liées aux: 1) distances entre les tranchées et profondeurs/ hauteurs différentes, par rapport à la surface libre et à la station de jaugeage de Podari (la rive gauche, ~240 m en amont et la rive droite ~295 m en aval) et 2) différentes conditions hydrodynamiques pouvant survenir au moment du dépôt des couches alluviales et au long du processus de consolidation, menant à des épaisseurs différentes des couches, en particulier des plus profondes.

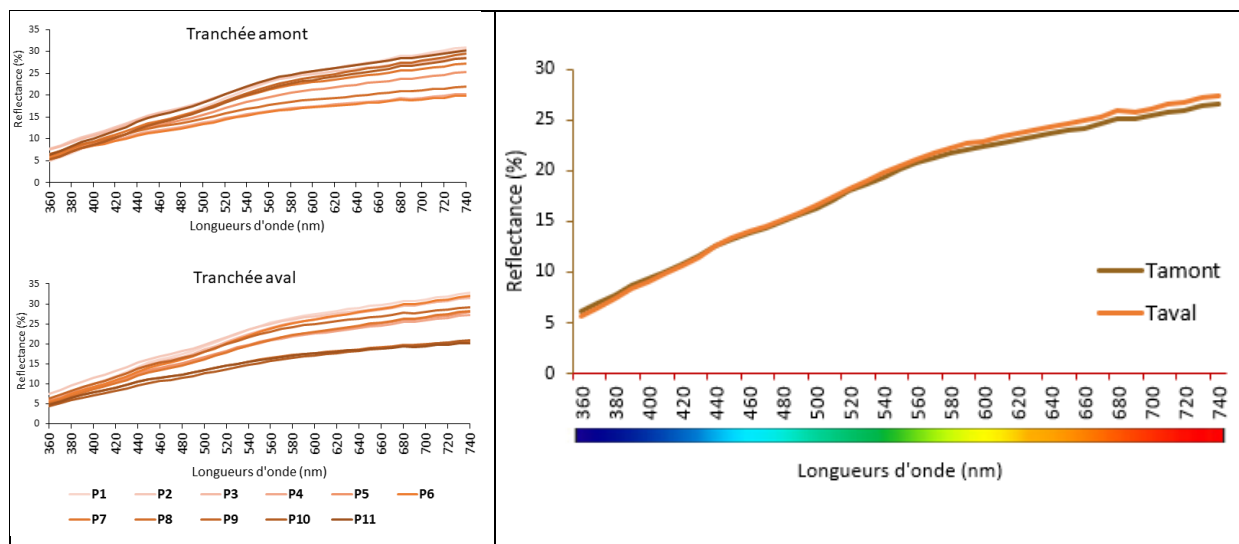
Nous allons passer à la deuxième façon de confirmer la stratigraphie, à savoir la couleur.

### **9.1.1.2. Couleur et colorimétrie**

La couleur des couches sédimentaires a été analysée selon deux approches : 1) visuellement, afin de déterminer s'il y a des différences de couleur/ nuance entre les couches ; 2) sur la base des indices colorimétriques présentés au chapitre §8.2.4, que nous avons utilisé pour tester statistiquement les différences entre les spectres colorimétriques des couches, mais également entre les deux tranchées.

L'analyse visuelle, sur le terrain ou sur les photographies des deux tranches, a permis de constater qu'elles avaient des nuances différentes, allant du brun clair au brun foncé. Dans la tranchée  $T_{\text{aval}}$ , les couches 5, 7 et 8 semblaient être les plus sombres, tandis que les couches 10 et 11 étaient les plus claires, ce qui a été confirmé plus tard à la fois par la colorimétrie et par l'analyse géochimique de la teneur en charbon. Lors de l'exploration, nous pouvons faire les mêmes observations pour les plus récents  $P_{10}$  et  $P_{11}$ , plus  $P_3$  et  $P_4$ , de couleur assez sombre.

Sur les 17 indicateurs décrits au §8.2.4., nous avons retenu les trois premiers pour la comparaison des deux tranchées ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), qui fournissent des informations sur le diagramme de chromaticité. Ainsi, l'indicateur  $L^*$  nous a donné une idée de la noirceur du sédiment, des petites valeurs (qui tendent à 0) correspondant aux échantillons plus foncés (où nous nous attendons à trouver du charbon, par exemple) et les valeurs élevées, des plus claires (plus proche du maximum de 100), indiquant des sédiments plutôt propres avec un contenu plus important de sable. Alors que l'indice  $L^*$  reflète la luminosité de la couleur, les indices  $a^*$  et  $b^*$  sont les coordonnées de chromaticité [Konica Minolta, 1998] du diagramme. Dans ce type de diagramme,  $a^*$  et  $b^*$  indiquent les directions de couleur: +  $a^*$  est la direction rouge, - $a^*$  est la direction verte, +  $b^*$  est la direction jaune et - $b^*$  est la direction bleue. Le centre est achromatique ; au fur et à mesure que les valeurs  $a^*$  et  $b^*$  augmentent et que le point s'éloigne du centre, la saturation de la couleur augmente aussi. La **Figure IX.2** est une représentation du spectre colorimétrique moyen des deux tranchées, obtenu en médiant les valeurs de l'énergie électromagnétique émise en chaque intervalle de longueurs d'onde en visible par chacun des 11 échantillons composant les deux tranchées alluviales.



**Figure IX.2.** Les spectres visibles moyens des tranchées  $T_{\text{aval}}$  et le  $T_{\text{amont}}$  : Gauche – Spectres des 11 échantillons ; Droite : Spectres moyens per tranchée

Les résultats montrent seulement une relation plus étroite entre les couches P3 et P9 des deux tranchées et pour le reste, elle n'est pas concluante. Cela nous amène à la conclusion que la comparaison des couleurs et de la distribution spectre-colorimétrique de deux tranchées dont l'historique de déposition des couches est inconnu, porte des incertitudes.

### 9.1.1.3. Contenu en charbon et en carbone totale

Nous avons décrit en détail dans le chapitre §8.7 la procédure géochimique de la séparation des particules de charbon du reste des matières composant les échantillons des couches sédimentaires. Nous allons nous référer maintenant seulement au contenu en charbon, concernant les deux tranchées, et non pas à la spéciation houille – lignite, qui a été faite pour la tranchée principale ( $T_{\text{aval}}$ ), uniquement (*Annexe 15*).

Même si cela ne nous amène pas au but de notre analyse, nous pourrions également mentionner ici la distribution de la teneur totale en carbone (TTC) analysée pour la tranchée  $T_{\text{amont}}$  (dont le protocole de laboratoire a été décrit dans le chapitre §8.7). Comme ce paramètre comprend aussi le contenu en charbon, ainsi que d'autres types de carbone provenant d'autres sources organiques (principalement de l'agriculture), les deux paramètres devraient être en phase pour indiquer une bonne séparation des couches. Bien que pour les couches moins riches, la comparaison ne soit pas aussi évidente, nous avons essayé de voir si cela fonctionne également pour les couches avec les plus riches en TTC et en charbon.

Les résultats ne coïncident pas vraiment avec la variation de la teneur en charbon, qui indique cette fois que les couches 6 et 8 sont les plus riches. De notre point de vue, cette différence peut être expliquée soit par les différentes fractions de sédiment utilisées (63 microns pour la TTC et <1000 microns pour la teneur en charbon), soit par le fait que le TTC avec ou sans prise en compte de sa granulométrie, est principalement constituée de particules non charbonnées (c'est-à-dire que dans la teneur en carbone, le charbon n'en est qu'une partie infime). Nous allons garder en réserve les résultats, car ils pourraient s'avérer utiles pour l'interprétation des sources des sédiments lors des épisodes de crue analysés au chapitre §7 (prédominance des sous-bassins agricoles dans l'apport de sédiments fins?).

La détermination du contenu en carbone totale n'a pas prouvé donc son utilité dans notre analyse, car les couches de sédiments peuvent contenir du carbone en proportion variables en fonction des sources



productrices (i.e. l'agriculture). L'étude ne porte pas, cependant, sur ce type d'activités anthropiques. Par contre, la teneur en charbon est un outil très efficace pour trouver au moins une partie des sources des sédiments fins localisés dans les bassins d'exploitation du charbon. Toutefois, pour cette étape de l'analyse, la différenciation des couches en ce qui concerne une teneur en charbon ou carbone n'est pas très pertinente. La confirmation de la stratigraphie se réfère plutôt à la vérification de la représentativité de la tranchée aval.

## 9.1.2. Caractéristiques des couches

Cette partie concerne que la tranchée T<sub>aval</sub> et porte sur la caractérisation de plusieurs points de vue: granulométrie, colorimétrie, espèces de charbon et teneur totale en métaux lourds. Le but a été de différencier les couches (et ainsi de confirmer la stratigraphie) selon leurs différentes propriétés.

### 9.1.2.1. La granulométrie

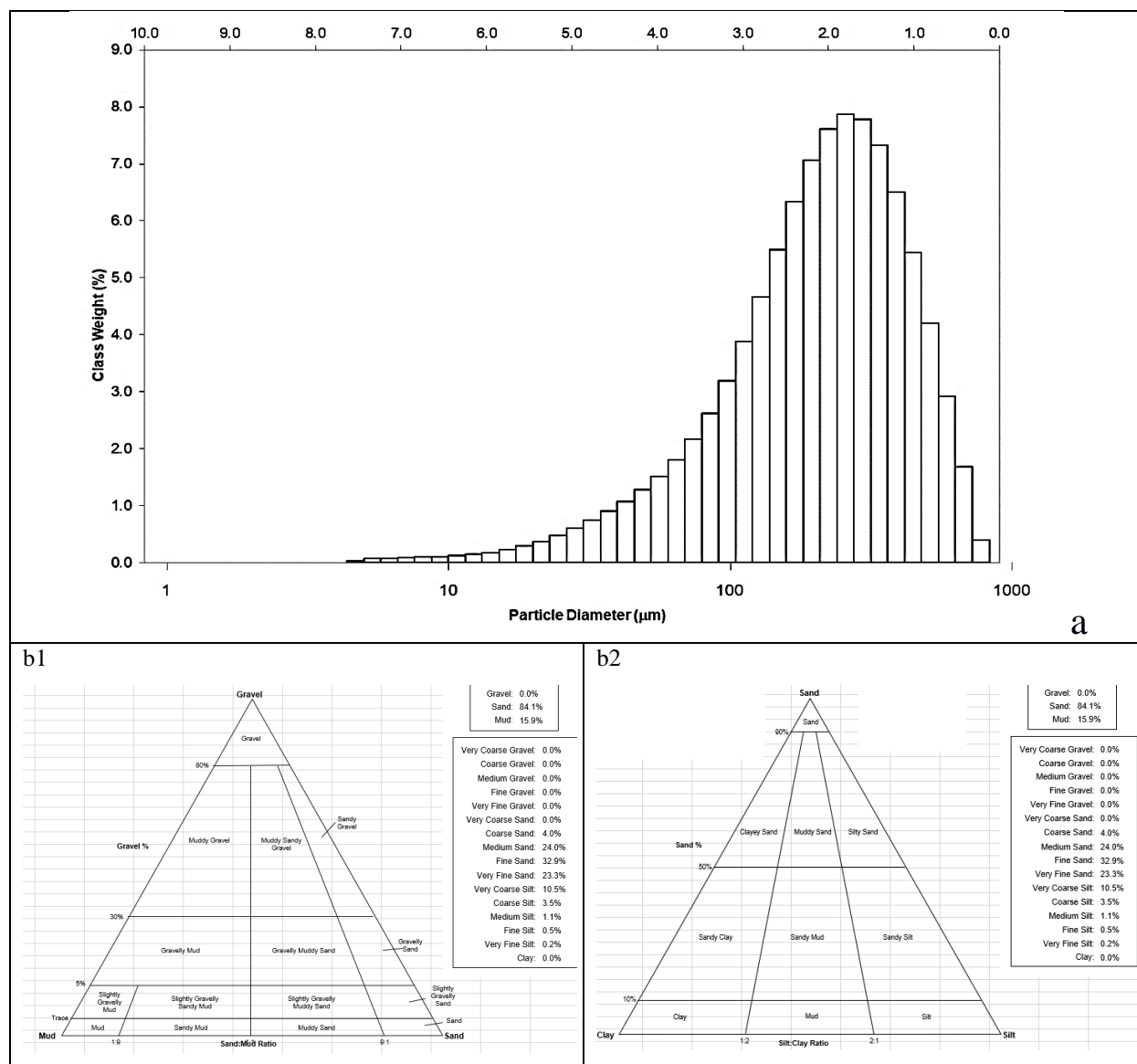
La granulométrie des dépôts alluviaux peut varier considérablement d'un endroit à l'autre le long de la rivière, en raison des variations des conditions hydrodynamiques. Pour cette raison, nous considérons qu'il est peu probable que les caractéristiques granulométriques se conservent d'un site à l'autre le long de la rivière, même pour deux couches déposées par la même crue. Les échantillons soumis à l'analyse granulométrique ont été analysés à l'aide de plusieurs méthodes, qu'on va détailler ci-après.

Pour le calcul des paramètres granulométriques spécifiques portant sur la taille des particules, le package R "G2Sd" a été utilisé. Les paramètres statistiques suivants ont été calculés à l'aide de la méthode des moments: moyenne, mode (s), tri (écart type), asymétrie, kurtosis, D10, D50, D90, D90/D10, D90-D10, D75/D25 et D75 - D25. Les paramètres décrivant la taille des grains ont été calculés de manière arithmétique et géométrique (en microns) et logarithmique (en utilisant l'échelle phi) [Krumbein et Pettijohn, 1938]. Dans le **Tableau IX.1**, une synthèse des résultats pour les 11 couches de la tranchée T<sub>aval</sub> sont présentées. L'interpolation linéaire a été également utilisée pour calculer des paramètres statistiques à l'aide de la méthode graphique de Folk et Ward (1957) et en déduire des descriptions physiques (telles que «sable très grossier» et «trié modérément»).

**Tableau IX.1.** Les principaux paramètres statistiques concernant la taille des grains pour les 11 couches de la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari (calculs moyens sur les 11 couches de la tranchée)

Granulométrie Laser (mm)		Granulométrie par tamisage – poids des échantillons (g)					
MODE		<4000 mm	<3.5 mm	<1000µ m	<500µ m	<250µ m	<63µ m
MODE	257.7						
D <sub>10</sub> :	55.23	0.25	8.09	42.06	42.19	3.62	0.30
D <sub>50</sub> :	191.9		4.99	12.33	14.17	96.65	20.16
D <sub>90</sub> :	460.2		0.13	1.05	80.48	116.20	6.55
(D <sub>90</sub> / D <sub>10</sub> ):	8.333		0.35	4.50	69.76	91.26	11.35
(D <sub>90</sub> - D <sub>10</sub> ):	405.0		0.43	3.15	105.45	54.74	3.68
(D <sub>75</sub> / D <sub>25</sub> ):	3.017		0.42	3.76	73.86	77.55	10.32
(D <sub>75</sub> - D <sub>25</sub> ):	212.3		0.38	3.49	102.28	48.25	4.79
			0.24	0.61	13.65	124.20	17.16
			0.43	2.50	63.71	103.42	11.81
				7.95	85.05	106.12	15.61
				0.44	5.11	84.53	35.78
			0.56	2.96	54.85	85.70	13.20

Les courbes cumulatives de la distribution granulométrique ont été comparées, tous les échantillons étant compris entre 1,65 et 1 000 microns. Des différences entre les échantillons ont toutefois été observées, à la fois en termes de forme de la courbe granulométrique cumulative et de la distribution des concentrations des classes granulométriques (**Figure IX.3.a**). Enfin, pour encadrer les 11 échantillons de sédiments en classes de granulométrie, deux types de diagrammes ternaires ont été réalisées : le diagramme « *Gravel-sand-mud* », pour les particules les plus grossières (**Figure IX.3.b1**), respectivement « *Sand-silt-clay* » diagram, pour les plus fines particules (**Figure IX.3.b2**), les deux aussi connues comme les diagrammes de Robinson, Shepard et Folk. Chaque point représenté correspond à l'intersection des valeurs de catégories de granulométrie, exprimées en pourcentages [Folk, 1954; Fournier *et al.*, 2012].



**Figure IX.3. a.** Distribution granulométrique (cumulative et volumétrique) des 11 échantillons de la tranchée aval (valeurs moyennées) ; **b.** Exemples de diagrammes ternaires des Robinson, Shepard et Folk : **b1.** – distribution des particules grossières ; **b2.** – distribution des particules fines

Les couches ont été aussi décrites du point de vue du groupe textural auquel les échantillons appartient et le nom du sédiment (tel que «sable fin graveleux grossier») après Folk (1954). Le **Tableau IX.é** indique le pourcentage de grains pour chaque fraction de taille. Il a été modifié à partir de Udden (1914) et de Wentworth (1922).

**Tableau IX.2.** Les groupes texturaux auxquels les 11 couches de la tranchée T<sub>aval</sub> appartiennent (*moyennes des 11 valeurs obtenues pour chaque classe granulométrique*)

GRAIN SIZE DISTRIBUTION			
GRAVEL:	0.0%	COARSE SAND:	2.6%
SAND:	85.4%	MEDIUM SAND:	22.2%
MUD:	14.6%	FINE SAND:	34.9%
		V FINE SAND:	25.7%
V COARSE GRAVEL:	0.0%	V COARSE SILT:	10.0%
COARSE GRAVEL:	0.0%	COARSE SILT:	2.9%
MEDIUM GRAVEL:	0.0%	MEDIUM SILT:	1.1%
FINE GRAVEL:	0.0%	FINE SILT:	0.5%
V FINE GRAVEL:	0.0%	V FINE SILT:	0.2%
V COARSE SAND:	0.0%	CLAY:	0.0%

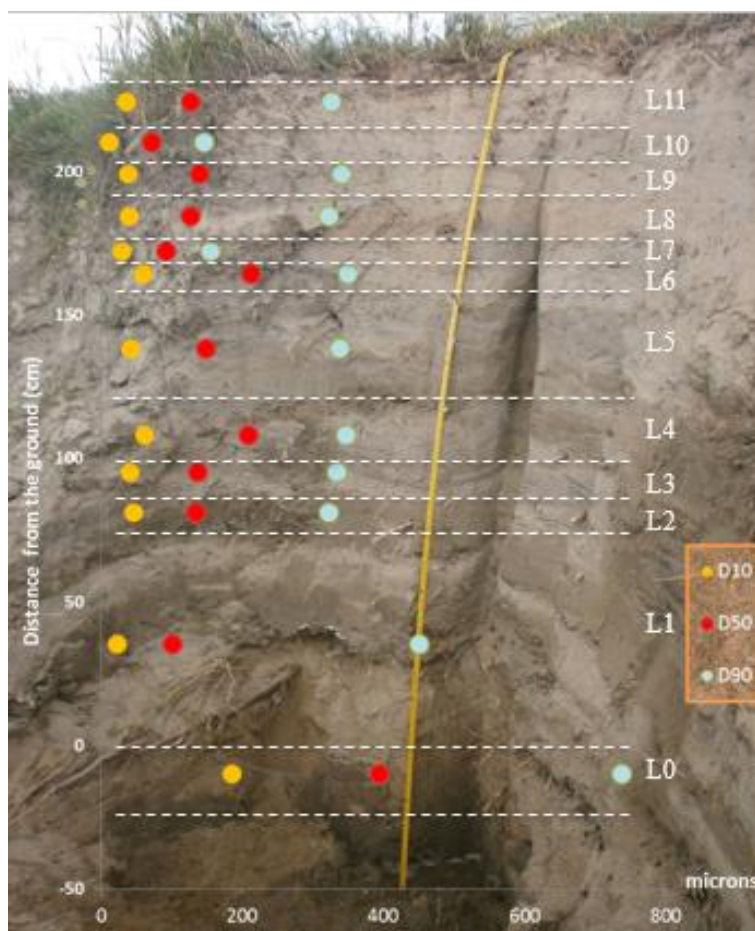
Les résultats montrent que les sédiments présentent une distribution uni-modale dans 10 échantillons et bimodale pour l'échantillon P10. Les sédiments sont caractérisés par un tri des particules relativement faible (P<sub>1</sub>-P<sub>7</sub>), à l'exception des couches P<sub>8</sub> et P<sub>11</sub>, de granulométrie moyennement triée. Cette caractéristique, bien que non déterminante dans la différenciation des couches, montre qu'elles sont assez homogènes en distribution des tailles granulométriques, ce qui peut indiquer que les sédiments composants se sont déposés lors du même épisode de crue.

Nous remarquons qu'il existe des différences nettes entre les couches, en particulier entre la plus récente (supérieure) et la plus ancienne (de la base). En ce qui concerne la taille des grains, les couches supérieures sont plus homogènes (en particulier P<sub>10</sub> et P<sub>7</sub>), tandis que celles du milieu sont plus étalées en termes de la taille des trois diamètres caractéristiques (D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub> et D<sub>90</sub>). Par exemple, la couche P<sub>1</sub> présente une différence de plus de 400 microns taille des particules pour le D<sub>10</sub> par rapport au D<sub>90</sub>. Cela peut signifier soit que la couche est très hétérogène (les sédiments composants proviennent des bassins versants où la lithologie et les conditions hydrodynamiques de la mise en suspension sont très différentes), soit que cette couche est composée, à son tour, des petites d'autres couches plus homogènes. L'hypothèse de plusieurs sous-couches est plus plausible à notre avis, compte tenu de son épaisseur considérable, ce qui indique qu'il est peu probable qu'elle se soit déposée après une seule inondation. Toutes les autres couches (P<sub>2</sub> - P<sub>10</sub>) semblent être relativement homogènes (sauf P<sub>5</sub>, plus étendue), avec une taille moyenne des particules se diminuant vers le haut, en raison de la hauteur de la rive à partir de laquelle les sédiments plus fins (qui restent en suspension) pourraient être déposés par la crue.

Nous observons également que les sédiments sont prédominés par les sables (entre 75% et 91%), avec les 4 premières couches les plus anciennes un peu plus grossières et plus proches de distribution granulométrique, alors que les plus récentes couches ont un volume de sable alternant. En ce qui concerne les diamètres caractéristiques, la plus grande différence entre les couches résulte du calcul de la différence "D<sub>90</sub>-D<sub>10</sub>", qui révèle un passage net de P<sub>11</sub> à P<sub>10</sub>, avec des valeurs de 173 microns et 527 microns, respectivement. Par contre, le ratio D<sub>90</sub>/D<sub>10</sub> met en évidence la différence entre P<sub>6</sub>, qui est plus grossier, et les couches voisines. Ensuite, en termes de diamètres caractéristiques et aussi en ce qui concerne le diamètre module, P<sub>8</sub> et P<sub>9</sub> sont très similaires (les deux avec D<sub>module</sub> = 224 microns). Cette découverte pourrait

remettre en question leur correcte délimitation si un détail ne les différenciait pas, le type de tri granulométrique : la couche P<sub>8</sub> est plutôt composée du sable fin moyennement trié, alors que P<sub>9</sub> contient du sable fin très – avec des limons grossiers. Les plus grands doutes sont liés à la délimitation des strates P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>, qui présentent des valeurs similaires dans toutes les classes granulométriques et ont un degré de tri identique. Ils ressemblent également à P<sub>1</sub> pour la même raison, le diamètre module variant dans des limites très étroites, comprises entre 170 microns et 194 microns. Nous considérons que ce sont les incertitudes de nos analyses sur le terrain et en laboratoire qu'il faut considérer, car les 3 dernières couches de la tranchée sont de toute façon les plus anciennes et il est difficile de les relier exactement avec les crues qui les ont déposées.

Pour conclure, une vue sur la tranchée nous montre comment les diamètres caractéristiques (D10, D50, D90) varient le long des 11 couches analysées.



**Figure IX.4.** Variation verticale des diamètres caractéristiques des grains le long de la tranchée T<sub>aval</sub>

### 9.1.2.2. Colorimétrie

Vues à l'œil, les couches de sédiments varient en termes de couleur, de luminosité et d'obscurité. Même s'il s'agit parfois de la distribution granulométrique et de l'humidité caractérisant chaque couche, les différences de couleur vont bien au-delà de ces paramètres physiques et apparaissent comme une conséquence d'une certaine composition des sédiments. Dans notre cas, les particules de charbon seront utilisées pour expliquer les différences entre les couches. Étant donnée leur couleur sombre, leur présence devrait être capables de rendre les couches différentes les unes des autres et la colorimétrie sera utilisée comme un outil indirect pour mesurer cette différence en termes de nuance : brunâtre-clair (hypothèse de

la dominance des particules inorganiques plus pâles) ou sombre- brunâtre (en supposant une teneur en charbon beaucoup plus élevée).

Le premier indice colorimétrique que nous avons utilisé a porté sur les valeurs « x,y,z » du diagramme de chromaticité, dérivées des valeurs tristimulus XYZ [CIE, 1931] (voir §8.2.4). Ces valeurs sont déterminées sur la base des fonctions de correspondance de couleurs  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$  et  $z(\lambda)$ , pour un angle de vue de  $4^\circ$  et sont définies pour les objets réfléchissants par les formules suivantes [Konica Minolta, 1998]:

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{x}(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{z}(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda}$$

Où :

- $S(\lambda)$  - distribution spectrale relative de l'illuminant ;
- $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$  - fonctions de correspondance des couleurs pour CIE 2° Standard Observer (1931) ;
- $R(\lambda)$  - la réflectance spectrale de l'échantillon ;

Ensuite, les coordonnées de chromaticité « x,y,z » que nous avons utilisées à la fin ont été calculées à partir des valeurs de tristimulus XYZ, selon les formules suivantes:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

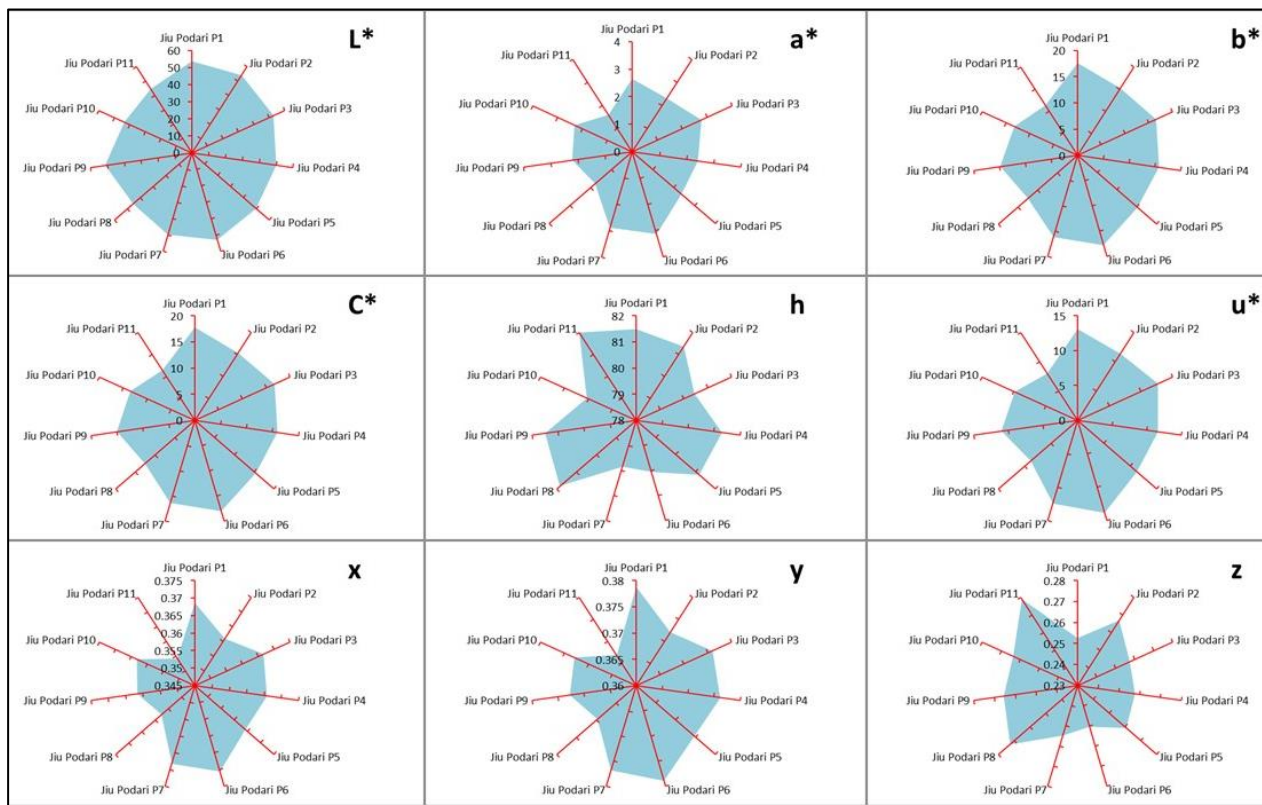
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y$$

Nous nous sommes beaucoup intéressés aux valeurs de l'indice "Y" indiquant à quel point l'échantillon est sombre ou clair, par rapport à un diffuseur idéal avec un facteur de réflexion de 100%. En d'autres termes, l'indice "Y" spécifie non seulement la couleur, mais aussi la réflectance perçue visuellement, car sa valeur est égale à la réflectivité d'un échantillon comparée visuellement à une surface blanche standard par une visualisation standard (moyenne) sous la lumière du jour moyenne. Dans la **Figure IX.5** nous présentons différents indices colorimétriques calculés pour les 11 échantillons de sédiments de la tranchée aval ( $T_{aval}$ ).

Pour une meilleure échelle de mesure et de comparaison, nous avons utilisé les valeurs standard des étalons vert - rouge - noir - blanc - bleu. Nous pouvons voir que toutes les valeurs « Y » pour les 11 couches sont situées entre 21,91 et 14,50, ce qui signifie qu'elles ont une réflectance similaire à celle des chromes entre les étalons rouge (11,065) et vert (21,978). Plus la valeur de « Y » est basse, plus la couleur de l'échantillon est sombre, car il tend à 4,4 (valeur de l'étalon noir) lorsqu'il fait noir et se comporte ainsi comme un corps noir capturant les rayons lumineux.





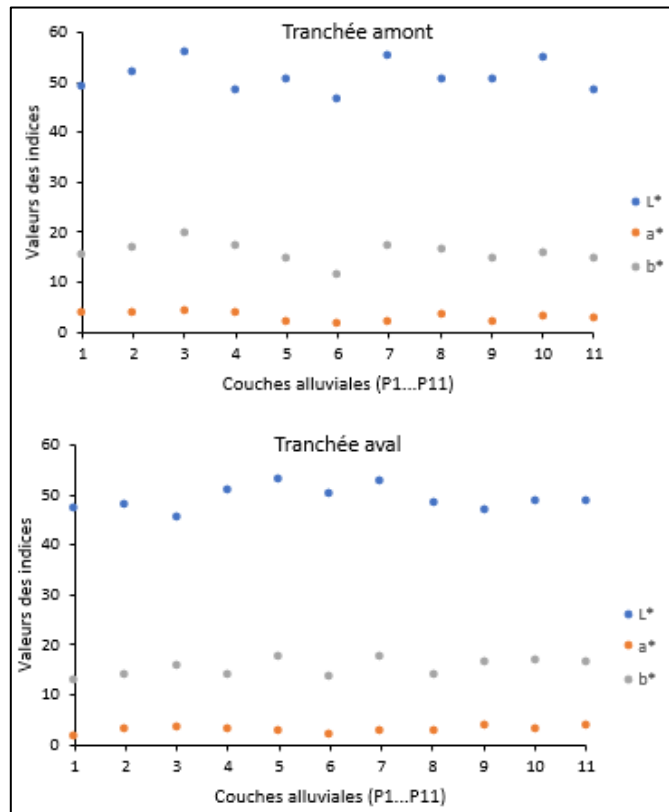
**Figure IX.5.** La variation des valeurs des différents indices des 11 échantillons de la tranchée (T<sub>aval</sub> de Podari)

Un autre indice très pertinent à utiliser dans la quête des plus sombres couches, qui devraient être les plus riches en teneur en charbon, est le L\*, la variable de luminosité du système CIE L\*u\*v\*. Pour les échantillons achromatiques, il couvre l'échelle des gris, du noir au blanc. Dans le cas des échantillons plus chromatiques, il varie du plus sombre au plus clair. Dans l'illustration, L\* augmente de bas en haut dans chaque colonne (**Figure IX.6**). La formule de calcul de l'indice L\* prend en compte la variable « Y » aussi, c'est-à-dire la luminance (la dépendance spectrale de la luminosité):

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

où Y est la luminance de l'échantillon et Y<sub>n</sub> est la luminance d'un réflecteur diffus parfait (échantillon blanc idéal).

D'après la variation de l'indice L\*, il résulte que l'échantillon de la couche P<sub>8</sub> a la valeur la plus haute, même si la réflectivité est l'une des plus basses (14,97%), ce qui signifie probablement qu'il contient la plus grande quantité de charbon dont les particules noires la rendent plus sombre. À la suite de l'analyse visuelle *in situ*, P<sub>8</sub> nous a paru l'une des couches les plus sombres et les plus riches en charbon. Mais dans ce cas, nous pourrions nous attendre à ce que, comme cela se produit avec les échantillons des autres couches, la réflectivité (Y) soit en phase avec la valeur L\*, donc les deux inférieures pour les échantillons plus sombres. Au lieu de cela, seule la valeur de « Y » est basse, pas les deux. Ainsi, la règle de liaison entre L\* et Y n'est pas respectée par l'échantillon P<sub>8</sub>, bien que les autres échantillons de nuances sombres à première vue (P<sub>5</sub> et P<sub>6</sub>) semblent avoir des valeurs plus petites. L'explication pourrait concerner uniquement l'autre couleur dominante, ce qui la rend plus lumineuse, en dépit de la présence des particules noires de charbon, également. L'analyse géochimique sera cruciale pour clarifier ce problème.



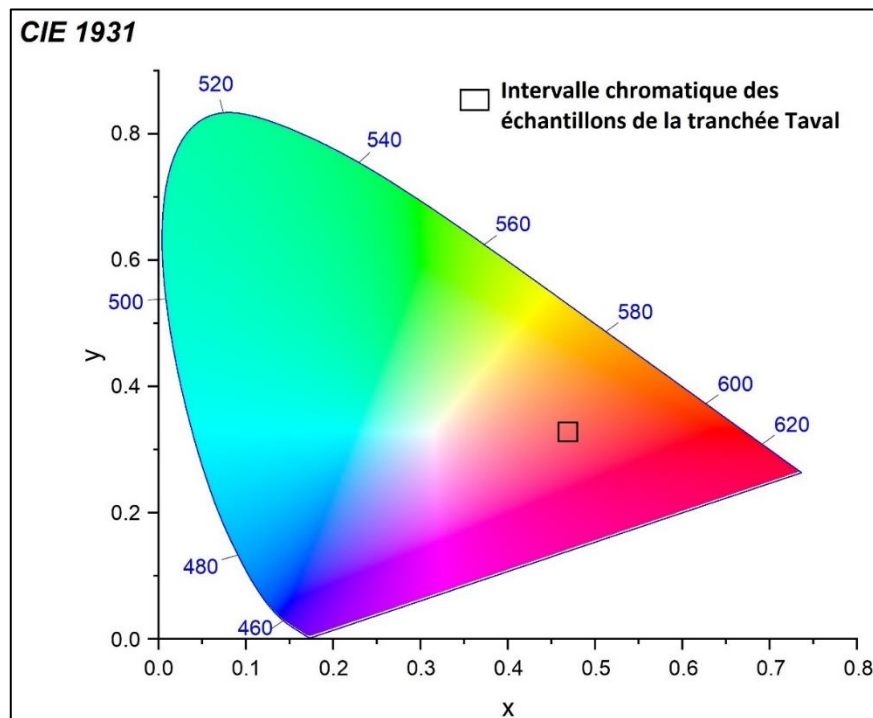
**Figure IX.6.** Variation de la valeur de  $L^*$  le long des tranchées. On fait l'hypothèse que plus sa valeur est petite, plus l'échantillon doit être plus sombre, voir plus chargé de particules de charbon

Les deux autres indices de l'espace  $L^*a^*b^*$  ( $a^*$  et  $b^*$ ) ont plutôt été examinés en termes de leur combinaison, ce qui rend la couleur la plus proche de celui de la couche sédimentaire typique composée d'un mélange de particules inorganiques (généralement plus claires) et de particules de charbon (particules sombres). En regardant simplement le diagramme empirique de la chromaticité, une couche visuellement reconnue contenant une plus grande quantité de charbon devrait se trouver quelque part à l'intersection du  $a^*$  entre 0 et 10 et  $b^*$  entre 10 et 20 (**Figure IX.7**). En traçant les deux indices sur le diagramme de chromaticité, nous pouvons voir plus clairement auxquelles couleurs les échantillons se rapprochent. Comme le montrent  $Y$  et  $L^*$ , les échantillons sont perçus comme un mélange de vert principalement et de rouge secondairement. Mais en même temps, lorsque nous diminuons les valeurs des indices et passons au rouge, cela est également lié au noir.

Le dernier indice nous avons employé dans cette analyse est issu de l'espace couleur  $L^*C^*h$  qui utilise le même diagramme que l'espace couleur  $L^*a^*b^*$ , mais avec des coordonnées cylindriques au lieu de coordonnées rectangulaires. Tandis que  $L^*$  indique la même luminosité de l'espace colorimétrique  $L^*a^*b^*$ , l'indice «  $C$  » correspond à la nuance et à «  $h$  » est son angle. Nous allons donc nous approcher de l'indice "h", qui est en fait un angle défini comme commençant à l'axe  $a^*$  et est exprimé en degrés ;  $0^\circ$  serait  $a^*$  positif (rouge),  $90^\circ$  serait  $b^*$  positif (jaune),  $180^\circ$  serait  $-a^*$  (vert) et  $270^\circ$  serait  $b^*$  (bleu). Les formules sur lesquelles les indices «  $C$  » et «  $h$  » sont basés sont:

$$\text{Chroma } C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$\text{Hue angle } h_{ab} = \tan^{-1}\left\{\frac{a^*}{b^*}\right\}$$



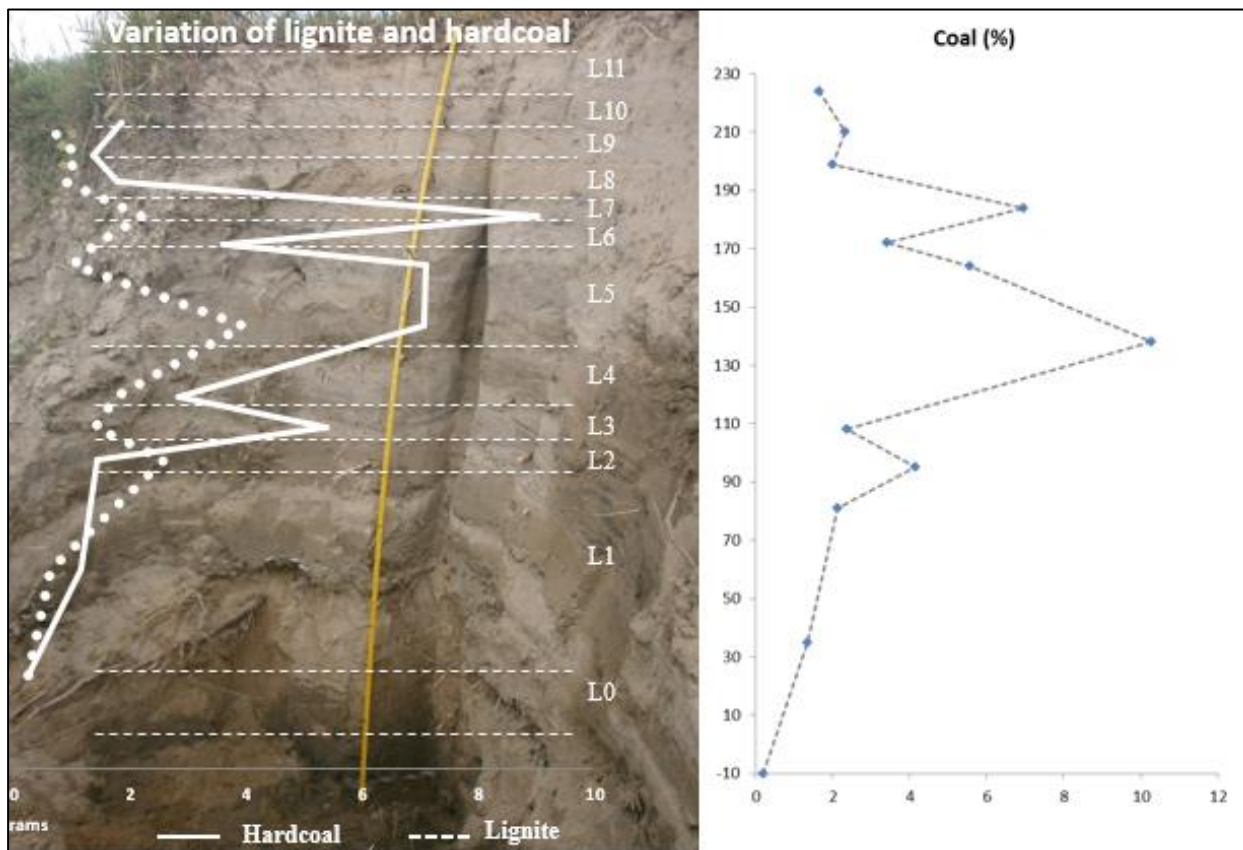
**Figure IX.7.** Diagramme de chromaticité et les 11 points correspondant aux couches de la tranchée  $T_{\text{aval}}$  de Podari (le système utilisé est CIE, 1931)

Comme précédemment, la référence est la valeur "h" de l'échantillon d'étalon noir, d'environ 58,3. Les valeurs négatives de cet angle correspondent à des échantillons très pâles à blancs, mais également plus proches du spectre de la couleur verte. Les autres valeurs positives concernent les échantillons de référence rouges (~ 34,6) et jaunes (~ 89,9). Pour les 11 couches de la tranchée analysée, les valeurs de cet indice varient de ~ 79 ( $P_7$ ) à ~ 86,2 ( $P_8$ ). En effet, la couche  $P_8$  devrait contenir une quantité importante de particules noires, mais également de particules jaunes, qui sont peut-être les particules que nous avons manquées en expliquant sa valeur élevée de l'indice  $L^*$ . Les 9 autres échantillons ont des valeurs très proches, allant de 80 à 84.

Malgré les petites différences de valeurs entre les couches, nous avons pu constater que l'indice  $L^*$  est plus faible pour  $P_5$  et  $P_6$ , ce qui confirme nos observations visuelles concernant leur couleur plus sombre. En opposition se trouve la couche  $P_8$ , dont la valeur de  $L^*$  la plus élevée. En termes de composition géochimique, les choses ne sont pas si simples et nous verrons bientôt pourquoi.

### 9.1.2.3. Contenu en charbon par espèces

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, outre la fraction inorganique dominante (particules sableuses, argileuses et limoneuses dans des proportions différentes), les 11 couches de sédiments de la tranchée en aval ( $T_{\text{aval}}$ ) de Podari contiennent également une quantité variable de charbon. Dans le bassin de la rivière Jiu, deux espèces de charbon peuvent être séparées par les procédures présentées au chapitre §8.2.5.2: la houille (provenant du bassin supérieur) et le lignite (une partie importante du secteur moyen). Ainsi, la quantité de charbon que nous pouvons trouver dans les sédiments (**Figure IX.8**) nous aide non seulement à distinguer les couches qui se sont déposées, mais également à savoir plus sur les sédiments provenant des bassins versants drainant les bassins d'extraction du charbon.

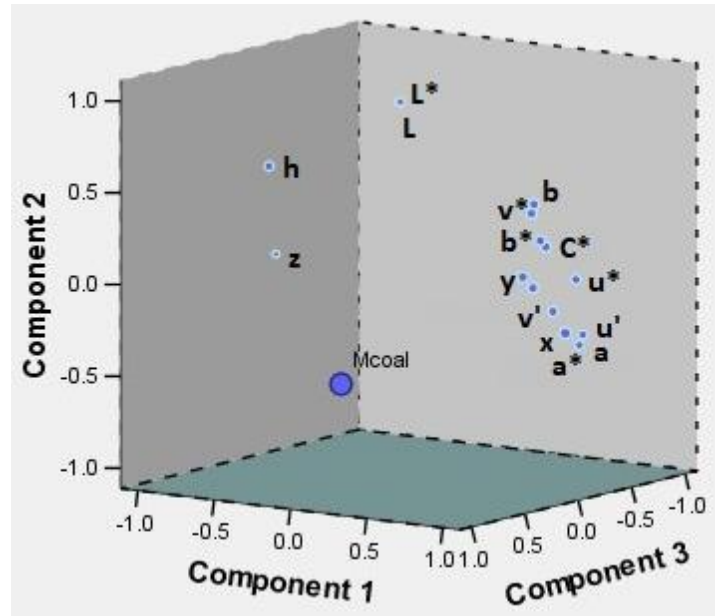


**Figure IX.8.** Variation de la teneur en lignite et houille dans la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari

Tous les échantillons, à l'exception de P<sub>2</sub>, présentent une teneur plus élevée en houille qu'en lignite. Ceci est en accord avec les informations générales que nous avons recueillies des analyses hydrologiques et géomorphologiques, et issues des rapports des autorités indiquant la présence de la houille dans les rivières (à cause des activités de lavage du charbon), plutôt que le lignite plus difficilement à atteindre dans le réseau hydrographique. En général, la teneur en lignite varie entre 0,82% (la couche inférieure P<sub>1</sub>) et 2,31% (la couche P<sub>5</sub>).

La teneur en houille varie entre 0,71% (P<sub>2</sub>) et 5,14% (P<sub>8</sub>). La quantité totale de charbon varie de 1,28% (P<sub>1</sub>) à 6,39% (P<sub>8</sub>). Les couches P<sub>5</sub> et P<sub>6</sub> suivent la couche P<sub>8</sub> en termes de teneur totale en charbon, ce qui est en accord non seulement avec la perception visuelle de leur couleur, mais aussi avec les mesures spectro-colorimétriques, qui ont montré des valeurs plus faibles des indices pour les échantillons de ces deux couches. Pour le P<sub>8</sub>, la présence de particules de charbon est maintenant confirmée, ce qui pose la question de ses valeurs en termes d'indices colorimétriques. Cette question reste ouverte pour les enquêtes futures.

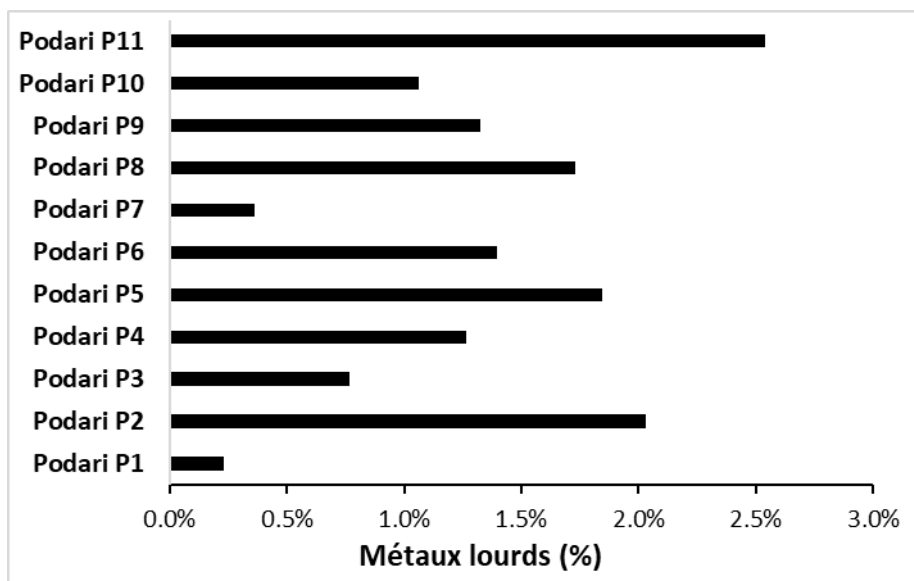
Afin de relier la teneur en charbon avec les indices colorimétriques, dans la **Figure IX.9** nous avons groupé les indices colorimétriques en fonction de la ressemblance de l'information qu'ils apportent pour expliquer la teneur en charbon, en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP). Les premières 3 composantes ont été sélectionnées.



**Figure IX.8.** Relation entre la teneur en charbon et les indices colorimétriques à travers l'analyse en composantes principales pour les 11 échantillons de la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari

#### 9.1.2.4. Teneur en métaux lourds et lanthanides

Comme présenté dans le chapitre §8.2., la teneur en métaux lourds (%) a été analysée de la même manière que la teneur en charbon et la variation du contenu de métaux est illustrée dans la **Figure IX.10**.



**Figure IX.10.** Variation de la quantité des métaux lourds dans la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari (%)

Les résultats sont très difficiles à interpréter si nous ne connaissons pas le fond géochimique et géologique des sous-bassins potentiels qui ont contribué à leur mobilisation et à leur transfert en aval. Cette fois, il n'y a que deux sources principales responsables, comme dans le cas du charbon, mais elles peuvent provenir de différentes parties du bassin de la rivière Jiu. Il semble exister un lien faible avec la teneur en charbon (beaucoup plus de métaux lourds dans l'échantillon P<sub>2</sub> ayant la plus forte teneur en lignite, ou dans l'échantillon P<sub>5</sub>, avec la deuxième teneur la plus élevée en houille), mais il serait hasardeux de faire une hypothèse sur la corrélation entre la teneur en charbon, la place de la couche dans la tranchée verticale (couche plus récente → crue beaucoup plus forte → beaucoup plus de métaux lourds transférés). Nous



allons reprendre ce débat au chapitre §10 en ce qui concerne les sources de sédiments, les épisodes de crue et les espèces d'éléments de métaux lourds présents dans les échantillons des couches déposées.

### 9.1.3. Synthèse des résultats. Mise en évidence des couches les plus cohérentes

Une fois toutes les méthodes utilisées pour confirmer la stratigraphie (caractéristiques physiques déterminées in situ et basées sur des photographies, granulométrie, colorimétrie, charbon et métaux lourds), nous pouvons conclure sur les traits communs identifiés au niveau de certaines couches sédimentaires.

Nous allons bientôt caractériser chaque couche dans l'ordre chronologique de leur dépôt et insister avec des explications sur les plus importantes (*Tableau IX.4*) Pour faciliter l'écriture et la description des paramètres, et par manque d'espace dans le tableau, nous avons employé des notations spécifiques.



**Figure IX.11.** Synthèse des résultats sur les couches sédimentaires au droit de la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari

L'épaisseur a été appréciée en termes de dimension en absolu (faible <10cm, moyenne de 10 cm à 20 cm, grande >20 cm), aussi qu'en relativisant une valeur obtenue déjà une tranchée par rapport à l'autre.

Le teneur en carbone organique totale (COT) n'a pas pu être appréciée que pour la tranchée T<sub>amont</sub>.

Le contenu de houille et de lignite occupe dans ce tableau des catégories séparées, pour mettre en évidence les variations en teneur de ces deux espèces de charbon de provenance différentes.

Le contenu de métaux lourds forme tout seul une catégorie distincte.

La couleur a été présentée couche par couche en tandem avec les indices colorimétriques qui la confirment.

Finalement, des remarques ont été faites pour les couches de caractéristiques particulières, qui pourraient jouer un rôle décisif dans la détermination des crues débordantes et des sources d'alluvions.

#### 9.1.4. Synthèse sur les méthodes utilisées pour l'analyse des sédiments déposés à Podari

L'utilisation de la tranchée pour analyser les effets du transport des sédiments lors des crues les plus fortes a été une option peu coûteuse et efficace. Cependant, le risque de ne pas repérer une berge d'accumulation de sédiments qui reflètent fidèlement les plus grandes crues devrait être réduit autant que possible. Pour nous assurer que nous avons bien délimité les couches sédimentaires, nous avons fait appel à une série de méthodes *in situ* et de laboratoire pour confirmer la stratigraphie et les différences entre les couches sédimentaires.

Nous pouvons dès maintenant faire un rapide retour d'expérience sur ces différentes méthodes.

- La comparaison des deux tranchées ( $T_{\text{amont}}$  et  $T_{\text{aval}}$ ) s'est révélée être une méthode utile pour vérifier la succession stratigraphique. Ainsi, à la fois dans la tranchée d'exploration ( $T_{\text{amont}}$ ) et de  $T_{\text{aval}}$ , 11 couches de sédiments sur un fondement plus épais ont été identifiées, probablement formée à son tour de plusieurs petites couches plus difficilement à repérer. Cependant, pour des approches similaires à l'avenir, nous devrions augmenter le nombre de tranchées et veiller à ce qu'elles se trouvent sur la même rive, ce qui faciliterait leur comparaison.

- L'analyse visuelle nous a aidé beaucoup dans le repérage des couches composant la succession stratigraphique, même si le choix des couches peut s'avérer subjectif et approximatif.

- La granulométrie est une méthode très utile pour analyser les couches de sédiments et éventuellement les comparer, mais dans le cas de plusieurs tranchées, on ne peut pas l'utiliser pour comparer deux dépôts provenant de la même crue potentielle. La dimension des grains déposés est principalement liée aux différentes conditions hydrodynamiques qui rendent difficile l'association d'un certain diamètre caractéristique des particules de sédiment (qu'on suppose être invariable) à la provenance de la crue. Cela a principalement à voir avec les conditions locales et avec la puissance du flux, ce qui peut être vu en termes de la magnitude du débit pour transporter des particules d'une certaine dimension sur une distance donnée, mais cela n'aide pas nécessairement à trouver les sources de sédiments dans le bassin versant. Cependant, à l'avenir, une nouvelle piste pourrait consister dans la recherche d'une certaine distribution granulométrique du charbon contenu dans les sédiments fluviaux.

- La colorimétrie s'est avérée être une méthode appropriée, à la fois pour comparer les deux tranchées, mais également pour la caractérisation individuelle des couches de sédiments de la tranchée principale. Les valeurs des indices colorimétriques varient en fonction de la profondeur des couches, les plus sombres se trouvant davantage dans la partie supérieure de la tranchée. Les indices choisis sont très utiles, mais ne peuvent pas être considérés comme une source d'information unique lorsque nous nous interrogeons sur la relation entre une grande quantité de charbon présumée et la couleur sombre du sédiment (pour rappeler la particularité de  $P_8$ ).

- Les méthodes géochimiques ont porté sur l'estimation de la teneur totale en carbone organique (COT) et la teneur en charbon. La première n'a pas réussi à être efficace, d'une part parce qu'il n'a pas été possible de l'appliquer que sur la tranchée d'exploration ( $T_{\text{amont}}$ ) et d'autre part parce que cette teneur est surtout composée du carbone provenant des sources et processus qui ne font pas l'objet de notre étude (lessivage des sols, métabolisme des organismes vivants, rejets agricoles comme les Pesticides). Il pourrait

être intéressant de suivre cette piste dans d'autres bassins versants plus petits, où l'on dispose d'informations sur le type de cultures agricoles pratiquées, ce qui n'est pas le cas dans le bassin de la rivière Jiu. De ce fait, nous avons décidé de considérer cette approche (analyse de la teneur totale en carbone) moins adaptée à nos objectifs et de l'abandonner pour de futures enquêtes. En ce qui concerne la deuxième méthode, la teneur en charbon, les résultats sont très utiles pour indiquer si les zones d'extraction de charbon ont davantage contribué à l'apport de sédiments. La variation des deux espèces de charbon (lignite et houille) semble cohérente avec les premières observations effectuées visuellement sur la couleur des sédiments. Ainsi, dans le contexte de cette particularité caractérisant le bassin de la rivière Jiu, l'analyse de la teneur en charbon semble hautement recommandable.

- La quantité de métaux lourds (sans distinction des éléments individuels dans cette phase de la recherche) n'a pas permis d'apporter de nouvelles informations précieuses sur les couches de sédiments, mis à part leur caractérisation générale. La teneur en métaux lourds est variable, mais il n'y avait pas de schéma clair avec la variation de la profondeur ou de la teneur en charbon. L'approche prouvera toutefois son utilité dans la détermination des sources de sédiments fins dans l'analyse hydrologique et géochimique complexe dans le chapitre §10.

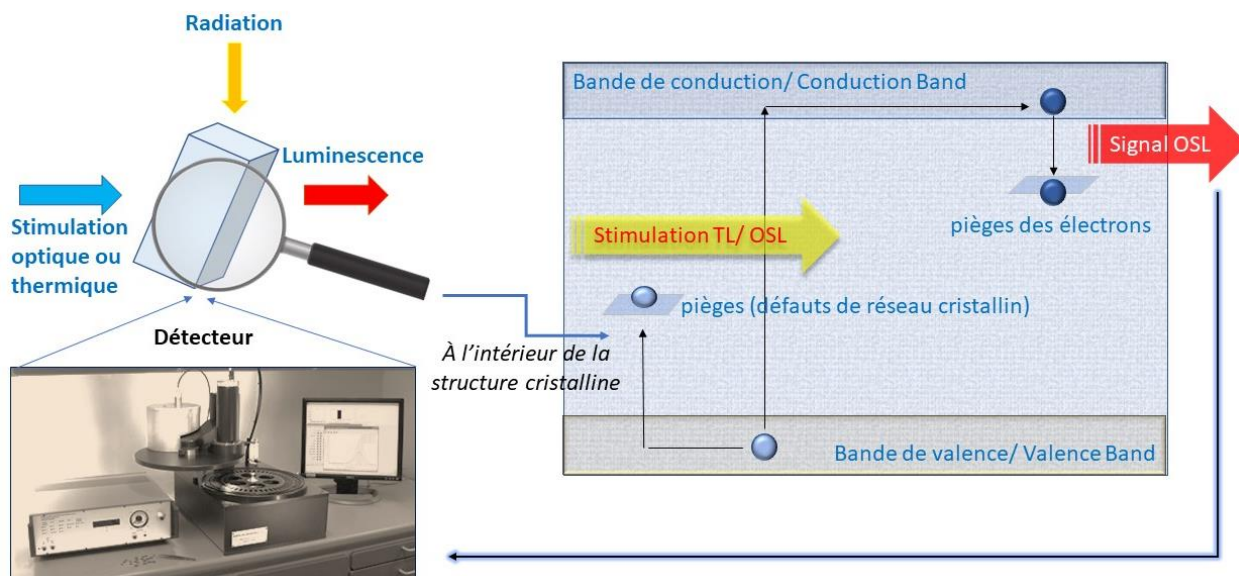
## 9.2. Datation de la couche basale

Ce sous-chapitre a pour but de déterminer l'âge approximatif du dépôt alluvial à Podari en analysant une couche basale. Le principe de départ est celui de la linéarité chronologique, à savoir que si la couche de base a un certain âge confirmé par des analyses en laboratoire, toutes les autres couches composant la séquence stratigraphique sont au moins concomitantes.

### 9.2.1. Principes de la datation par luminescence optiquement stimulée

La luminescence est un phénomène généré par la radiation électromagnétique émise en général dans l'intervalle des longueurs d'onde du domaine visible, par l'excitation non-thermique des atomes ou des molécules [Timar – Gabor *et al.*, 2013]. Les matériaux luminescents présentent dans leur structure cristalline la capacité d'absorber et de stocker une partie de l'énergie, pour l'émettre de nouveau sous la forme des photons au moment de la stimulation en laboratoire [Bøtter-Jensen *et al.*, 2003]. La luminescence n'est caractéristique que des matériaux à structure plus ou moins ordonnée, de nature cristalline ou vitreuse [Timar – Gabor *et al.*, 2013]. On parle des processus de stimulation (optique – OSL, ou thermique – TL) lorsqu'il s'agit de l'excitation des électrons et des espaces vides à l'intérieur des matériaux luminescents, phénomène accompagné par la capture des particules électromagnétiques dans certains défauts du réseau cristallin [Bøtter-Jensen *et al.*, 2003; Vasiliniuc, 2011].

L'interaction entre un matériel et le flux radiatif environnemental ou cosmique conduit à l'émission d'électrons de ce dernier, qui sont ensuite piégés dans des défauts de réseau cristallin [Cordier, 2010; Timar – Gabor *et al.*, 2013]. Certains des pièges sont considérés comme « instables » (« *pièges peu profonds* »). Cela signifie qu'un électron à l'intérieur d'un piège peu profond ne restera pas pendant toute la durée de l'enterrement (**Figure IX.12**). Au contraire, les défauts situés plus profondément à l'intérieur du réseau ont une durée de vie thermique plus longue. Ces « pièges profonds » (pièges stables associés à des niveaux d'énergie élevés) peuvent être utilisés de manière adéquate pour la datation [Cordier, 2010].



**Figure IX.12.** Le mécanisme du phénomène de luminescence. Version adaptée selon Aitken (1985), Timar – Gabor *et al.* (2013), Duller (2008) et le site internet de la compagnie [Landauer](#)

La quantité totale d'électrons piégés dans un cristal est proportionnelle à l'énergie totale absorbée et retenue par le cristal (ou la dose), d'où son exposition au rayonnement [Duller, 2008]. Dès que le minéral est exposé à la lumière solaire, par exemple lors de son transport, les électrons piégés absorbent l'énergie photonique (du Soleil) et sont libérés, ce qui signifie que le signal accumulé est perdu [Cordier, 2010].

La technique de datation par stimulation optique s'applique à des nombreux domaines : physique nucléaire, géologie, géomorphologie et paléoclimatologie, archéologie, qualité de l'environnement, (paléo)hydrologie, etc. La méthode de datation OSL (luminescence stimulée optiquement) exploite les propriétés dosimétriques de grains de minéraux présents naturellement dans les sédiments et les matériaux synthétiques, comme par exemple la céramique ou bâtiments en briques, importants dans les recherches archéologiques [Aitken, 1985; Lian et Roberts, 2006]. Dans la géomorphologie et notamment dans l'hydromorphologie, la datation optique s'est révélée être une méthode très courante, voir unique, et de plus en plus utilisée pour les sédiments jeunes, mis en place dans l'Holocène [Stokes, 1999 ; Duller, 2004].

Concrètement, la datation par la luminescence stimulée optiquement, cherche à trouver la quantité de radiation électromagnétique ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) accumulée dans ces cristaux à partir du moment où ils ont été exposés la dernière fois à la lumière (considéré être le moment de la déposition de la couche, dans le cas des dépôts sédimentaires), jusqu'au temps présent [Duller, 2008]. La radiation nucléaire est émise par les radionucléides des  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et leurs progénitures,  $^{40}\text{K}$  et  $^{87}\text{Rb}$ , le nombre d'électrons capturés étant proportionnel avec la quantité d'énergie absorbée de la radiation ionisante [Aitken, 1985; Timar-Gabor *et al.*, 2011]. Plus le matériel luminescent est exposé longtemps à cette radiation, davantage va-t-il recevoir une grande dose totale d'énergie dans sa structure cristalline.

Le flux de particules  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$  est en fonction de l'environnement avec lequel le matériel sédimentaire prend contact durant l'érosion, le transport (dans la veine d'eau, i.e. *les alluvions*, ou bien dans l'air, par exemple dans le cas du *læss*) et pendant la déposition. L'accumulation de l'énergie se fait pendant la période d'enterrement du dépôt, quelque soit sa nature : dépôt éolien (dune and *læss*), fluvial, glaciofluvial, deltaïque, colluvial, etc [Klassen *et al.*, 2006; Fiebic et Preusser, 2007; Balescu *et al.*, 2010 ;



Gabor – Timar *et al.*, 2010 ; Gabor – Timar *et al.*, 2011; Cordier *et al.*, 2012; Cunningham et Wallinga, 2012; Constantin *et al.*, 2015; Vespremeanu – Stroe *et al.*, 2017].

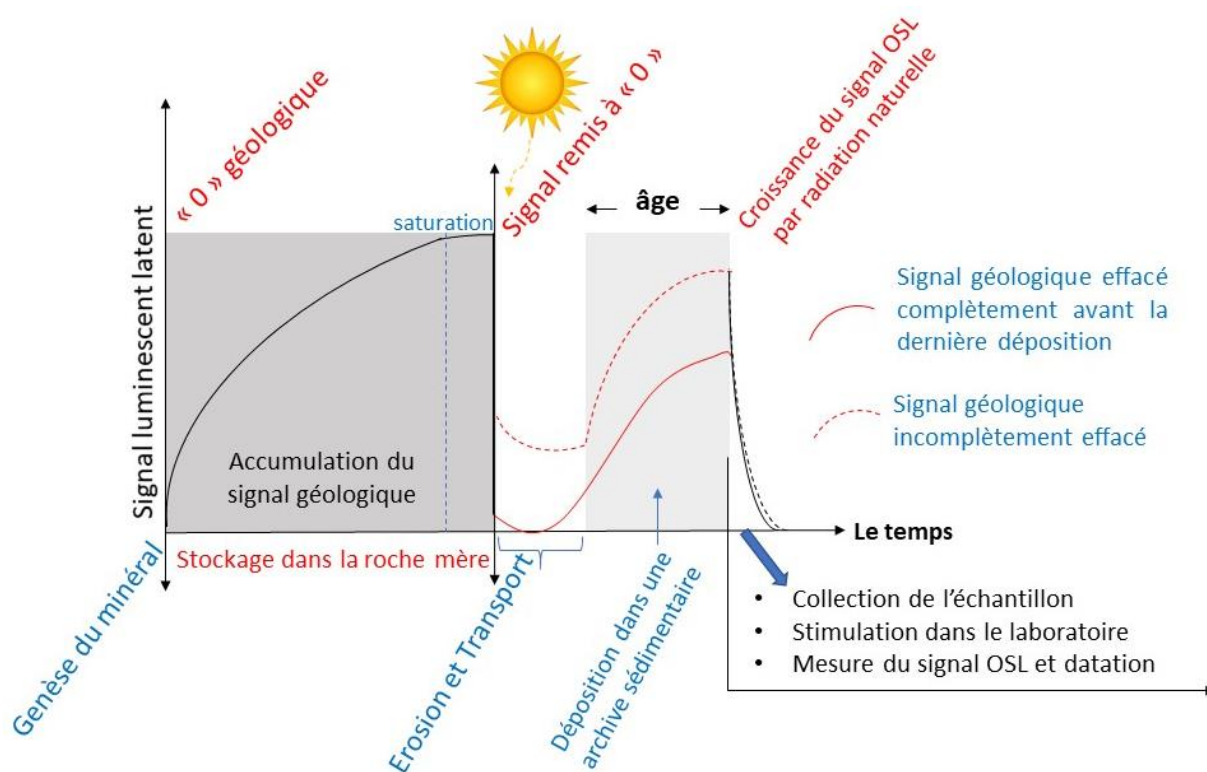
Dans la datation des dépôts sédimentaires, le plus simplement à comprendre la relation entre l'énergie stockée dans le minéral et l'âge du dépôt est de faire la parallèle avec les variables impliquées dans le calcul du volume liquide annuel d'une rivière. Si on connaît son débit moyen annuel, on est en mesure d'estimer son volume moyen annuel par la multiplication avec le nombre de secondes dans une année. *Mutatis mutandis*, la datation par exploitation des propriétés luminescentes des cristaux naturels de quartz ou feldspath d'un matériel sédimentaire est possible si on connaît la quantité totale d'énergie reçue (la dose totale) et le taux d'absorption de cette dose (quelle fraction de cette dose est absorbée chaque unité de temps). *La dose totale est équivalente au volume totale d'eau écoulée dans une certaine période, le taux d'absorption est le débit moyen journalier per unité de temps et l'âge du dépôt est le temps total dans lequel une certaine quantité d'eau peut ruisseler.* La différence entre le concept de calcul du volume multi-annuel dans une rivière et le calcul de l'âge d'un dépôt sédimentaire est donnée en premier temps par la complexité de ce dernier, et ensuite par le terme inconnu et par la durée du phénomène. Lorsque dans une étude hydrologique on cherche à obtenir le volume total d'eau dans une période connue (une année, un épisode de crue), dans la datation on ne connaît pas cette période, mais on sait « le volume », c'est-à-dire la dose totale de radiation. Quant à la durée, la différence entre l'exemple évoqué et la datation sédimentaire est évidente : lorsqu'en hydrologie, on travaille avec les chroniques de débits de quelques dizaines d'années dont l'unité temporelle de référence est le jour, le mois ou l'année, dans le domaine de la datation, on procède à un calcul au niveau des milliers d'années (unité de mesure, *ka*). Dans les cas moins fréquents de dépôts jeunes entre 100 - 50 ans (autour de la limite de détectabilité) et 1000 ans, la pratique est de convertir à la fin l'âge, initialement obtenu en milliers d'années [Gabor – Timar *et al.*, 2013].

L'âge qu'on date par la technique OSL n'est pas celui de la formation du minéral, mais le temps passé depuis la dernière exposition à la lumière du soleil du minéral détaché de la roche mère ou d'une vieille archive sédimentaire par érosion et transport. Dans la terminologie OSL, on parle souvent du « *moment de remise à zéro* », qui est en fait le moment de la dernière déposition du minéral dans la dernière archive sédimentaire, à partir duquel le signal luminescent s'accumule de nouveau par l'interaction avec la radiation environnementale et cosmique [Aitken, 1985; Duller, 2008; Gabor – Timar *et al.*, 2013]. Le principe de l'accumulation du signal OSL qui est utilisé dans la datation est illustré dans la **Figure IX.19**.

Dans le cas des sédiments, les processus d'érosion, transport et accumulation effacent le vieil signal OSL et le « *chronomètre luminescent* » est ramené à zéro. Lorsque les sédiments minéraux sont recouverts par d'autres minéraux sédimentaires déposés dans une couche supérieure, le nouveau signal lumineux est donc accumulé et peut être reconstitué. Toutefois, le signal OSL est complètement réinitialisé seulement si les rayons du soleil ne pénètrent plus. Si pendant ce temps une partie du dépôt sédimentaire est exposé à la lumière du soleil, le signal géologique n'est pas complètement effacé et il va y avoir du signal résiduel dans le nouveau signal OSL pendant la dernière déposition [Olley *et al.*, 1998]. Dans beaucoup d'endroits d'échantillonnage, quand même, l'accumulation de lumière latente dans les sédiments sous forme d'électrons captifs, peut donner une fausse réponse OSL, en augmentant le signal. Ou bien, étant données les conditions de dépôt et d'accumulation des sédiments fluviaux, fréquemment soumis à l'érosion hydrique



et, par conséquent, à l'exposition à la lumière du soleil, la conservation du signal n'est pas tout le temps fidèle. L'hypothèse implicite retenue est que cette exposition était suffisante pour éliminer tout signal préexistant [Duller, 2004].



**Figure IX.13.** La représentation schématique de la datation par stimulation lumineuse optiquement des sédiments (schéma adapté selon Timar – Gabor *et al.*, 2013 et Cordier, 2010)

Dans le laboratoire, la datation va se faire par l'exposition des granules de minéral au même agent – la lumière. Ainsi, le signal accumulé est enlevé, par avant d'être mesuré, pour ensuite être utilisé dans la détermination de l'intervalle entre le moment « zéro » de l'accumulation du signal dans l'archive sédimentaire et le moment présent, quand le signal est réinitialisé par stimulation artificielle [Gabor-Timar *et al.*, 2013]. Ce processus de "remise à 0" porte aussi le nom de "blanchiment" [Bailey *et al.*, 1997]. Dans leur étude, Cunningham et Walling (2012) affirment que, dans les systèmes fluviaux, le degré de blanchiment est minime et qu'il existe donc de grandes chances d'estimer l'âge correct des sédiments. Le débit de dose est généralement déterminé par des méthodes spectrométriques qui quantifient les sources de radioactivité dans l'environnement immédiat des échantillons de sédiments et même dans les sédiments minéraux. La contribution du rayonnement cosmique est également prise en compte.

Ces signaux luminescents sont mesurés en laboratoire et reflètent la dose de rayonnement totale (ou la dose équivalente -  $D_e$ ) reçue par les minéraux lors du dernier "ramener à 0" [Timar - Gabor *et al.*, 2013]. Le nombre d'électrons piégés est une mesure de la dose totale - la paléodose ou l'archéodose (la quantité totale d'énergie absorbée par l'intermédiaire de la radiation ionisante) que le minéral a reçue pendant une certaine période. Si on détermine également la vitesse à laquelle le minéral a absorbé la dose – c'est-à-dire la dose annuelle, cette période (c'est-à-dire un âge) peut être déterminée. Alors, l'équation générale de l'âge de stockage est [Timar - Gabor *et al.*, 2011]:

$$\hat{\text{Âge}} [\text{Ka}] = \frac{\text{dose équivalente} [\text{Gy}]}{\text{débit de dose} [\text{Gy} / \text{Ka}]}$$

Où  $Ka$  = l'âge exprimé en milliers d'années et par « Gy » = l'unité de la dose ou la paléodose : 1 Gy (ou Gray) = 1 J/kg

La datation par luminescence couvre généralement une période allant de quelques années à environ 100000 ans, avec une erreur relative minimale d'environ 6% [Timar - Gabor *et al.*, 2011]. Les sédiments quaternaires peuvent être datés avec une assez bonne précision même pour des systèmes fluviaux de quelques centaines d'années seulement, mais les archives sédimentaires historiques (Holocène – présent) sont rares dans de tels systèmes qui se caractérisent généralement par la prédominance de l'érosion par rapport à l'accumulation [Cordier *et al.*, 2012].

### 9.2.2. Le site et le protocole d'échantillonnage

Nous avons adopté la technique OSL pour la datation du dépôt alluvial de Podari, afin de confirmer son âge récent. Notre hypothèse initiale a été la mise en construction de l'archive autour des années 1970, après les inondations sévères d'octobre 1972, quand la rivière Jiu a atteint son débit historique de  $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (niveau historique de l'eau de 537 cm) et a engendré les plus grandes inondations de l'histoire récente de la ville de Craiova et ses banlieues. Suite à cet épisode de crue qui a débordé l'ancienne berge, en inondant aussi côté gauche et droit plusieurs cartier et communes suburbaines de la ville de Craiova, les autorités chargés de la gestion de l'eau ont démarré un plan de défense contre les inondations par la mise en place d'un système de digues tout au long de la rivière Jiu amont et aval de Craiova (voir le chapitre §6). On a vu la conformation de ces digues dans le chapitre §8.1., lors de la présentation du site de la tranchée (le dépôt alluvial situé 295 m aval de la station hydrométrique de Podari). On y ajoute ici seulement le fait que les digues ont été construites de terre, ayant une hauteur entre 1,5 et 2 m. Au droit de la tranchée, on peut observer la succession en travers des formes de relief fluviale anthropique et naturel : le village de Podari s'étale sur la terrasse de la rivière Jiu jusqu'à la ligne de partage des eaux entre le bassin de la rivière Jiu et celui de la rivière Desnățui. Entre cette terrasse et la berge où on a creusé la tranchée il y a la digue construite entre 1973 et 1976, qui se distingue aussi assez clairement comme une ligne droite entre la rivière et la terrasse. Le dépôt sédimentaire est stable et paraît ni trop jeune ni trop vieille; on peut le prouver par le chemin des bergers qui est battu chaque jour presque par les troupeaux de bétails.

La végétation ne semble pas être récente, mais par contre fixant la pente, plus en amont, la végétation touffue colonise la rive et est même remplacée vers le pont d'une petite forêt.

Bien que l'on ne le trouve pas abondante à l'emplacement exact de la tranchée (à l'exception de quelques espèces herbacées), ces caractéristiques de la végétation témoignent de la continuité de ce dépôt d'accumulation, qui aurait probablement dû être formée en même temps sur toute sa longueur.

Toute la démarche de l'analyse hydro-sédimentaire autour du dépôt alluvial de Podari est d'une importance capitale, étant donnée son potentiel d'avoir stocké les sédiments transportés par les plus grandes crues. Cette archive sédimentaire reflète aussi les conditions locales d'accumulation, que les processus d'érosion, transfert et dépôt des alluvions lors des plus forts événements hydrologiques en terme de capacité de transport. Pour trouver ces événements, on a fait une hypothèse forte de laquelle une grande partie des autres démarches dépend: *les sédiments se sont déposés dans les dernières décennies; leur mise en place est liée aux plus grandes crues qui ont mis en submersion la berge; on peut donc lier ces phases*

de dépôt des couches successives à des crues dont les débits de pointe ont été consignés dans les chroniques hydrologiques de la station hydrométrique de Podari, les dernières 50 – 70 années. On s'attend donc que les sédiments de cette succession verticale de couches soit datés de quelques dizaines d'années.

On prend, toutefois, une marge d'incertitude à cette estimation d'âge, force de trois considérantes.

1) Plus on se rapproche du présent, moins on trouve du signal OSL accumulé dans les sédiments récents. On risque d'être dans la situation du blanchiment partiel („partial bleaching”), à cause du fait que les alluvions n'ont pas eu le temps suffisant d'être complètement exposés à la lumière solaire lors de l'érosion ou lors de la remise en suspension. A tout cela, on peut ajouter l'influence du milieu de transport qui est l'eau turbide pendant les crues. Les périodes de crues sont connues comme étant caractérisées par des jours nouageux, pluvieux et on n'exclut pas la possibilité que le transfert de ces sédiments dans une masse d'eau de forte turbulence, sous un ciel couvert, n'aurait pu totalement effacer l'ancien signal. Par conséquent, nous prenons en considération aussi un âge apparent plus grand qu'attendu, de quelques dizaines d'années de plus.

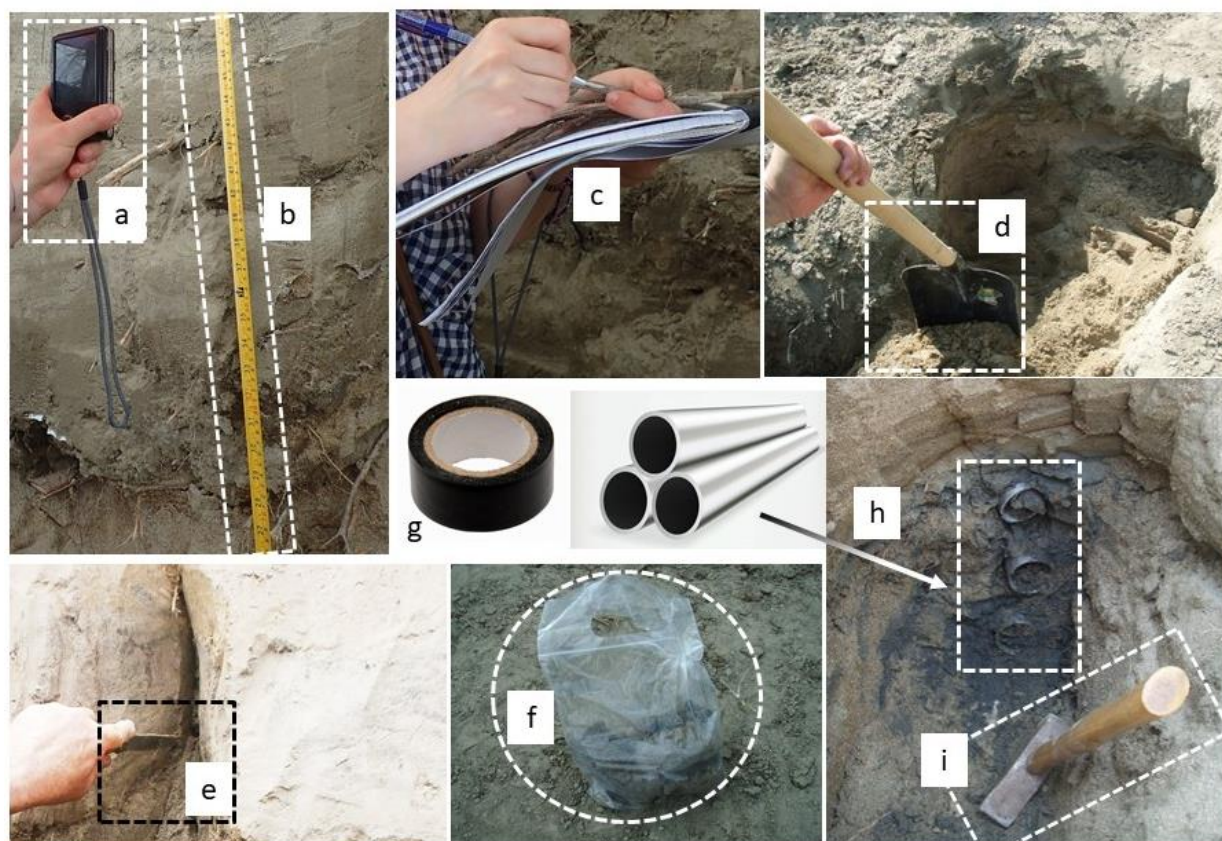
2) Meme avec une remise à zéro complète du signal OSL et d'une accumulation continue de flux radiatif entre le moment du dépôt et le présent, on se retrouve dans la zone limite de l'application de la technique par luminescence. Au delà de quelques dizaines d'années, il est techniquement difficile, voire impossible, de pouvoir mesurer l'âge, à cause de la dose artificielle de stimulation qui ne peut pas baisser au-dessous de 1 – 2 secondes, équivalentes à quelques fractions de Gray.

3) Nous avons essayé de considérer les conditions géomorphologiques et hydrologiques, pour être ensuite capables de formuler des hypothèses de recherche et utiliser le jeu de données des crues pour trouver les sous-bassins potentiels à avoir contribué au dépôt des certaines couches sédimentaires. Plus concrètement, nous avons considéré que la digue a été construite sur une berge submergée ou franchissant le niveau de l'eau à quelques centimètres seulement. En plus, on a considéré que le niveau de la rivière (et par conséquent le thalweg) était dans les années '70 plus bas qu'au présent. Néanmoins, rien ne nous assure qu'une partie de la berge actuelle devant la digue n'était pas inondée à l'époque. Par conséquent, il est possible que les couches inférieures de l'archive sédimentaire soient plus vieilles que la digue.

Tenant compte des restrictions au raisonnement qu'on vient de mentionner et des conditions à respecter à l'endroit et au moment de l'échantillonnage, on a fait le premier essai de datation sur trois échantillons tirés de la couche bazale (le P<sub>0</sub>, situé le plus bas parmi les autres couches de la tranchée). L'échantillonnage a été organisé le 1 septembre 2018, pendant une période de bas à moyennes eaux (65.8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> alors que le Q<sub>moy</sub> de septembre est de 36.8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, ce qui correspond à un niveau de 112 cm).

En suivant les instructions fournies par le *Guide de l'utilisateur pour Luminescence*, les instruments apportés pour l'échantillonnage ont été les suivants: grande pelle, un couteau de terrain pour le nettoyage des sédiments de la surface de la tranchée et la collecte des échantillons pour l'analyse de la dose; trois tubes en métal opaque avec une marge nette à une extrémité pour pénétrer dans l'affleurement; un marteler; des sacs en plastique transparents pour collecter des échantillons environ 15 cm autour de chaque tube pour calculer la dose; des sacs en plastique noirs pour emballer les tubes; du ruban adhésif pour boucher le tube d'échantillon; ruban d'emballage; marqueur permanent pour l'étiquetage des échantillons; carnet de notes

sur le terrain pour documenter le contexte stratigraphique, la localisation GPS et l'altitude; roulette pour mesurer la profondeur de l'échantillon; appareil photo (*Figure IX.14*).



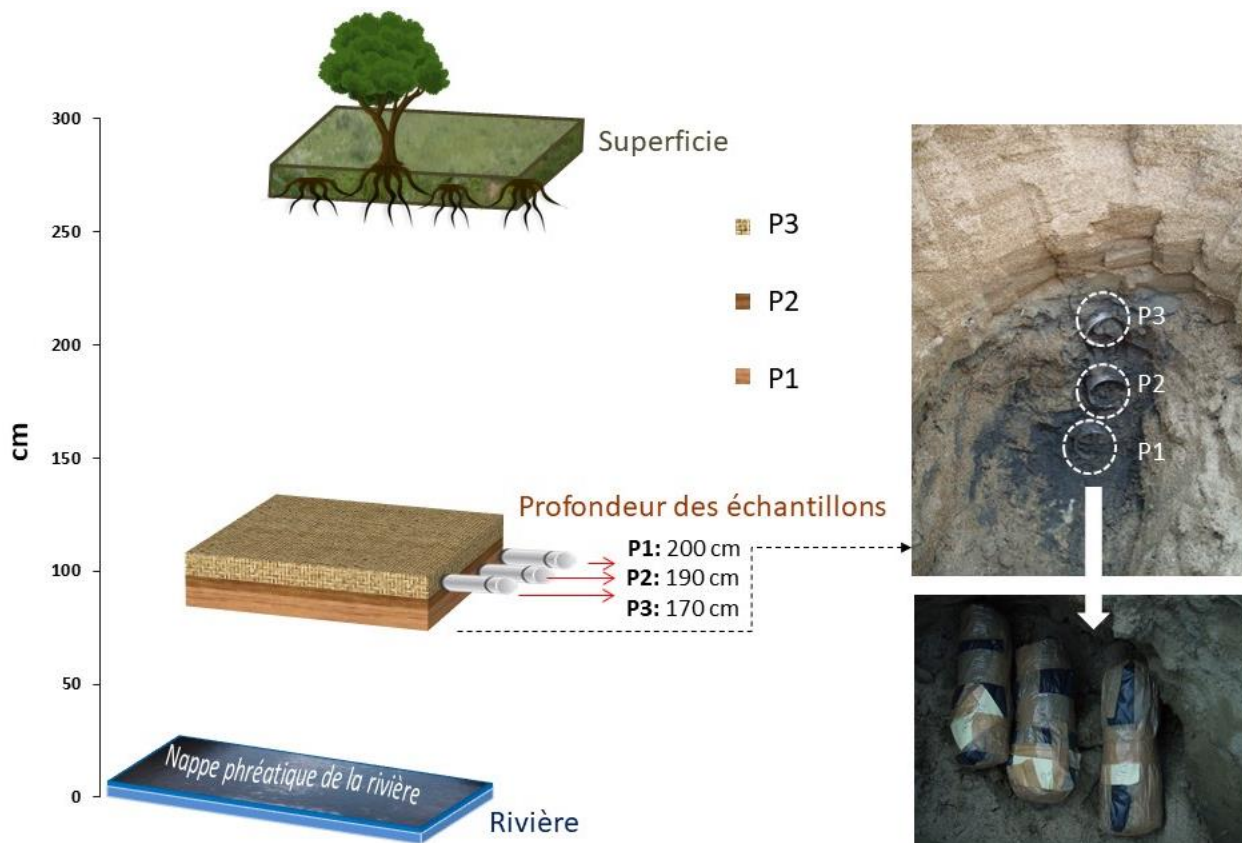
**Figure IX.14.** Matériel de collecte d'échantillons utilisé pour la datation par luminescence des sédiments de la tranchée de Podari: a – appareil photo; b - roulette à mesurer; c – carnet de notes; d – pelle; e – couteau de terrain; f – sac en plastique pour l'échantillon environnementale; g – ruban adhésif noir opaque; h – tubes en alluminium; i – marteler

Nous avons collecté deux types d'échantillons: **a)** les échantillons principaux, contenus dans les tubes, qui devaient être tenus à l'abri de la lumière pour la datation OSL et **b)** des échantillons pour les mesures de débit de dose, en creusant le dépôt dans une zone autour des tubes à échantillons de rayon d'environ 15 cm (qui ont ensuite été placés dans des sacs en plastique transparents). Nous avons prélevé trois échantillons de sédiments assez homogènes (couches de sable épaisses avec une certaine proportion de charbon, ce qui nous a incité à croire que le dépôt est récent).

Lors de la manipulation des tubes collecteurs une attention particulière a été portée au moment de l'introduction sur le plan horizontal dans la berge. En raison de l'ensoleillement dans la journée et à l'occasion de notre première expérience d'échantillonnage dans le but de la datation, le risque était de laisser les rayons solaires pénétrer les échantillons, entraînant la dégradation de leur signal OSL. Nous avons donc décidé de collecter les trois échantillons très près les uns des autres, à environ 1,7 - 2 m sous la falaise, où les rayons du soleil n'étaient plus perpendiculaires et les couches de sédiments étaient ombragées. De plus, nous avons essayé d'éviter l'échantillonnage à moins de 1 m sous la surface du sol, en raison des difficultés rencontrées pour déterminer le débit de dose cosmique (et également à cause des raisons de sols alluviaux et de racines de végétation différents se mélangeant un peu plus haut vers la



surface)<sup>44</sup>. Après avoir introduit les tubes, les bords extérieurs ont été recouverts de ruban adhésif noir opaque avant d'être retirés, pour empêcher l'exposition à la lumière et la perte de sédiment. Le bord opposé a été immédiatement isolé avec du ruban adhésif noir et les trois tubes ont été placés dans des sacs en plastique noirs, étiquetés (**Figure IX.15**). La latitude, la longitude et l'altitude du site ainsi que la profondeur des échantillons pour calculer la contribution cosmique à la dose équivalent ont été mesurés et notés dans le cahier de terrain [Nelson *et al.*, 2015].



**Figure IX.15.** Schéma et procédure d'échantillonnage

### 9.2.3. Le protocole de laboratoire

L'ensemble des procédures portant sur la datation des échantillons des sédiments prélevés de la tranchée de Podari a été effectué dans le laboratoire de dosimétrie de l'Institut des bio-nanosciences de Cluj-Napoca (Institutul de Cercetari Interdisciplinare în Bio-Nano-Științe).

#### 9.2.3.1. Le choix du dosimètre et de la granulométrie

Afin de procéder à la datation, *le premier pas* consiste à choisir le type de cristal à analyser. Même si le phénomène de luminescence apparaît dans le cas d'un tiers des minéraux, les applications dans la datation ont été faites seulement sur les cristaux de quartz et feldspath [Timar - Gabor *et al.* (2013)], alors que des bonnes propriétés de luminescence sont reconnues aussi dans les cristaux de zirconium et apatite [Smith *et al.*, 1986 et Smith, 1988, cités par Timar - Gabor *et al.*, 2013].

Il a été démontré que le signal OSL dans le quartz et le feldspath est blanchi de manière différente dans les grains de sédiment et que l'âge résiduel dans les feldspaths sont significativement plus élevés que

<sup>44</sup>Des instructions plus précises peuvent être consultées sur [OSL sampling sheet](#)



ceux calculés pour le quartz [Fiebing et Preusser, 2007]. Ainsi, il est plus courant d'attribuer l'âge en datant le signal OSL sur des cristaux de quartz que sur le feldspath, surtout dans le cas des dépôts fluviaux récents [Mercier, 2008; Cunningham et Walling, 2012; Cordier *et al.*, 2012]; Medialdea *et al.*, 2014]. Au contraire, le feldspath s'avère être plus avantageux pour l'étude des sédiments au-delà de la limite de datation supérieure du quartz, car ils présentent des signaux luminescents qui saturent des doses plus élevées que celles obtenues à partir du quartz [Klasen *et al.*, 2006; Vasiliniuc, 2011]. Dans notre cas, les sédiments fluviaux du site de Podari sont très récents et il était donc très pratique d'utiliser des **cristaux de quartz**, car il y avait moins de chances que la faible énergie accumulée en un temps aussi court ait été supprimée des trous d'électrons de quartz que de celle du feldspath.

Enfin, il est important de garder à l'esprit que le quartz est un minéral largement répandu dans la croûte terrestre, présent dans une proportion d'environ 13%, dans des sédiments d'âges différents, à la fois sous forme cristalline et amorphe [Gabor-Timar *et al.*, 2013]. Cela pourrait être considéré comme un argument supplémentaire pour utiliser le quartz comme dosimètre naturel luminescent. Dans les sédiments fluviaux, le quartz est très abondant constituant la majeure partie de la composition du sable. Cependant, la sensibilité réduite du signal OSL observée pour certains cristaux de quartz, en particulier dans le cas de sites caractérisés par une histoire récente de stockage de sédiments, doit être prise en compte. Dans ces conditions, le signal émis par le quartz peut être très faible, voire absent [Lukas *et al.*, 2007, cités par Timar - Gabor *et al.*, 2013]. Nous allons en tenir compte dans l'interprétation des résultats de notre analyse, étant donnée l'âge récent que nous estimons pour nos échantillons.

*La deuxième étape* pour établir le protocole d'analyse des échantillons a consisté à choisir la granulométrie. Le comportement des trois types de rayonnement ( $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ ) peut être différencié si on ne considère certaines fractions granulométriques pour les mesures de luminescence [Vasiliniuc, 2011; Gabor *et al.*, 2013].

Nous avons choisi l'intervalle *des fractions grossières entre 63 et 90  $\mu\text{m}$* . Dans ce second cas, la couche externe des granules affectée par le rayonnement alpha (faible pouvoir de pénétration) est éliminée par traitement avec acide fluorhydrique (HF), en laissant passer que les contributions bêta (partiellement atténué) et gamma [Bøtter-Jensen *et al.*, 2003]. La procédure de séparation des deux fractions est décrite dans la section suivante.

### **9.2.3.2. L'extraction des cristaux de quartz**

#### **9.2.3.2.1. Précisions générales**

Le travail avec les sédiments en vue de la datation a demandé une attention particulière pour ne pas les exposer à la lumière du soleil ou artificielle (l'ampoule électrique ou toute autre source de lumière des appareils) durant la préparation des aliquotes. Pour ce faire, la préparation des échantillons a eu lieu dans une chambre obscure, sous une lumière rouge de faible puissance, afin d'éviter toute perte de signal lumineux. Le protocole de laboratoire a été adapté d'après Zimmerlan (1971), Lang *et al.* (1996) et Frechen *et al.* (1996) et il est détaillé dans Timar-Gabor (2013) - Annexe III (Anechitei – Deacu *et al.*, 2013).

La première procédure a été de séparer le matériau sédimentaire des extrémités des tubes (approximativement 2 cm), de celui du milieu. Cette opération a été effectuée pour deux raisons : (i) pour

éviter la contamination - les sédiments retirés des têtes de tube ont été exposés à la lumière sur le terrain et présentent toujours un risque de perte du signal OSL, ce qui les rend inappropriés pour extraire les minéraux intéressants pour la datation ; (ii) ces sédiments peuvent être utilisés dans la spectroscopie gamma à haute résolution pour déterminer la dose annuelle. Nous reviendrons sur le calcul de cette dose dans la section suivante.

Le matériel récupéré du milieu a été stocké dans des conteneurs en plastique de type Berzelius de capacité 2l, pesé à l'état humide, laissé à sécher dans l'étuve, puis repesé à l'état sec.

Afin d'extraire les cristaux de quartz, les échantillons ont été ensuite soumis à plusieurs opérations qui peuvent être groupées en trois catégories : a) opérations conjointes au début du traitement du matériel, indiscernables de la fraction granulométrique ; b) opérations relatives à la fraction grossière et c) les opérations visant à isoler et à traiter la fraction fine.

#### 9.2.3.2.2. Traitement avec HCL

La première étape chimique est le traitement avec HCl (10 %) pour éliminer les carbonates. Chaque échantillon a été immergé dans un bain d'acide chlorhydrique, mélangé et laissé au repos pendant environ 24 heures. Le processus a été répété jusqu'à ce qu'aucune réaction effervescente ne soit observée lorsque l'acide a été ajouté aux échantillons. Après élimination des carbonates avec HCl, les échantillons ont été rincés 3 fois avec de l'eau distillée.

#### 9.2.3.2.3. Traitement avec H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

À ce stade, un deuxième traitement chimique avec H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (35 %) a été appliqué pour éliminer les matières organiques. Sous la niche, nous avons ajouté H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mélangé les échantillons dans la solution et laissé pendant la nuit. La procédure a été répétée 3 fois avant qu'aucune réaction ne soit observée lorsque du peroxyde d'hydrogène est ajouté à l'échantillon. Lorsque l'élimination des matières organiques a été obtenue, les échantillons ont été rincés à l'eau distillée.

#### 9.2.3.2.4. Le tamisage des échantillons

Après les deux traitements chimiques, les échantillons ont été tamisés plusieurs fois, afin de séparer les différentes classes granulométriques. Tous les tamisages ont été faits en état humide, en ajoutant du matériel avec une spatule et en éliminant les granules de dimensions inférieures à l'ouverture du tamis par mélange dans l'eau distillée. Premièrement, nous avons séparé la fraction fine (<63 µm) de celui plus grossière (>63 µm). Ensuite, de la granulation grossière, nous avons séparé la fraction 63 – 90 µm, qui a été choisie pour l'utilisation du quartz grossier dans la datation.

#### 9.2.3.2.5. La séparation du quartz du matériel grossier (63 – 90 µm)

Afin d'isoler les cristaux de quartz des autres minéraux qui peuvent entrer dans la composition de nos échantillons (argiles, feldspaths, charbon, métaux lourds), le principe de séparation en fonction de la différence de densité des minéraux a été appliqué. Le quartz est un minéral de densité assez élevée et pour le séparer, nous avons préparé une solution de densité de <2,62 g/cm<sup>3</sup> en dissolvant dans l'eau distillée un liquide dense (le métatungstat sodique – Na[H<sub>2</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]). Pour chaque échantillon, nous avons pesé 4 fois

2g de matériel, transféré dans des éprouvettes sur lesquelles le même volume de liquide lourd a été ajouté. Chacune des 4 éprouvettes a été centrifugé pendant 30 min à 3000 rotation/min.

Le quartz et les minéraux lourds se sont déposés sur le fond des éprouvettes et tous les autres minéraux moins lourds ont été séparés du liquide à travers une toile synthétique très dense, posée sur des entonnoirs en verre. La fraction de densité  $< 2,62 \text{ g/cm}^3$  s'est ainsi déposée sur la toile. Ensuite, la fraction lourde  $> 2,62 \text{ g/cm}^3$  a été récupérée des éprouvettes par le même procédé à l'aide de la toile dense. L'opération a été répétée jusqu'à ce que les éprouvettes soient restées propres sur le fond (pas de fraction lourde en plus). Après chaque préparation du liquide lourde, la densité a été vérifiée et si nécessaire, corrigée. A la fin, le matériel ainsi séparé a été laissé à sécher dans l'étuve et à la fin pesé.

#### 9.2.3.2.6. Le décapage avec HF

Le quartz grossier a subi à ce stade un traitement chimique qui consiste à enlever la couche externe des granules. Lors de l'élimination de cette couche, la contribution externe des particules alpha a été éliminée et, en même temps, la séparation des minéraux de plagioclase de ceux de quartz par dissolution des feldspaths qui présentant une résistance chimique plus faible. L'opération a été réalisée sous la niche dans des récipients en plastique, en traitant les échantillons de quartz avec HF (acide fluorhydrique) pendant 40 minutes. Après le traitement avec HF, une solution de HCl (10%) a été ajoutée afin d'éliminer les fluorures qui se sont formées. A ce stade final, la solution a été mélangée à chaque 10 min pendant une heure. A la fin de cette opération, les échantillons ont été lavés trois fois dans l'eau distillée, séchés dans l'étuve et leur poids a été déterminé.

#### 9.2.3.2.7. La séparation des granules poliminérales de 4 – 11 $\mu\text{m}$

Les granules  $< 11 \mu\text{m}$  ont été séparées de la fraction  $< 63 \mu\text{m}$  isolée dans le pas §8.3.3.2.4., par dépôt dans les cylindres d'Atterberg selon la loi de Stokes. L'équation mathématique décrivant cette loi portant sur la vitesse de sédimentation de petites particules sphériques en milieu liquide a été déduite à partir de l'étude des forces agissant sur une particule en descente le long d'une colonne de liquide sous l'influence de la gravité. La vitesse de dépôt des particules  $> 11 \mu\text{m}$  peut être obtenue en appliquant l'équation suivante :

$$v = \frac{2}{9} (d_1 - d_2) \cdot g \cdot r / \eta$$

Où  $d_1$  et  $d_2$  = la densité de la particule et du liquide ;  $r$  = le rayon de la sphère ;  $\eta$  = la viscosité du liquide ;  $g$  = la constante gravitationnelle ; et  $v$  = la vitesse de chute.

Les fractions fines des trois échantillons ont été mises à flocculer dans des récipients de plastique, en présence de l'hydroxyde d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ). Ensuite, le matériel a été transféré dans des cylindres qui devait contenir 20 g d'échantillon et de l'eau distillée jusqu'à une hauteur de la colonne bien déterminée dans le laboratoire du point de vue de la relation antérieurement décrite pour le calcul de la vitesse de chute. Chaque cylindre a été étanché avec du parafilm et agité pour homogénéiser le contenu. Le temps nécessaire pour la déposition des particules de dimensions 11 – 63  $\mu\text{m}$  a été déterminée auparavant dans le laboratoire à l'aide de la loi de Stokes, en utilisant le logiciel SediCalc, en fonction d'une série de paramètres : a) la dimension de la particule (dans ce cas 11  $\mu\text{m}$ ) ; b) la hauteur de la colonne d'eau au long de laquelle les particules  $< 11 \mu\text{m}$  restent en suspension ( $\sim 25 \text{ cm}$ ) ; c) l'accélération gravitationnelle –  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  ; d) la

densité de la particule ( $\approx 2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ ) ; e) la température de l'eau (mesurée pour chaque cylindre, car elle peut varier avec la température ambiante); f) le temps de sédimentation (min).

Après la sédimentation, l'eau de la colonne supérieure contenant les particules d'intérêt ( $<11 \mu\text{m}$ ) a été pompée avec un tuyau en caoutchouc fin et flexible dans des récipients en plastique. Pour chaque échantillon, plusieurs conteneurs ont été remplis, étiquetés et laissés à décanter pour déposer les particules en suspension sur le fond. Au bout de 1 à 2 jours, lorsque toute la matière fine en suspension a été décantée, de l'eau a été versée et les récipients en plastique ont été portés à l'étuve pour sécher la matière  $<11 \mu\text{m}$ .

#### 9.2.3.2.8. La procédure d'élimination de la fraction $<4 \mu\text{m}$

Le but de cette étape est de séparer la fraction poliminérale de 4 - 11  $\mu\text{m}$ , pour la datation. Afin de déposer les granules  $> 4 \mu\text{m}$ , le matériel fin ( $<11 \mu\text{m}$ ) a été centrifugé durant 1 minute dans l'eau distillée à 1000 rotations/ min. Les particules en suspension  $<4 \mu\text{m}$  ont été éliminées par la décantation de l'eau des éprouvettes et le matériel d'intérêt a été collecté séparément dans des récipients étiquetés, séché et pesé. Les procédures de centrifugation se sont répétées jusqu'à ce que l'eau soit devenu limpide et toute matière en suspension évacuée.

#### 9.2.3.2.9. La séparation du quartz de la fraction poliminérale fine (4 – 11 $\mu\text{m}$ )

De la fraction de 4 à 11 microns obtenue à l'étape précédente, § 8.3.3.2.8, la procédure de séparation du quartz utilisée dans la datation a été suivie. Pour cela, les échantillons de matériaux fins ont été traités chimiquement avec de l'acide hexafluorosilicique à 35% ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ) pendant 7 jours. Pour ce traitement chimique, les échantillons de matériaux fins ont été placés dans des conteneurs en plastique sur lesquels une quantité suffisante d'acide hexafluorosilicique a été ajoutée pour recouvrir le sédiment. Au cours des 7 jours, chaque échantillon a été mélangé au moins une fois par jour. Après ce traitement, les autres minéraux qui accompagnent le quartz ont été éliminées par rinçage à l'eau distillée 3 fois. Les échantillons ont été séchés dans l'étuve, pesés à l'état sec et utilisés pour préparer les aliquotes.

#### 9.2.3.3. La préparation des aliquotes

Une fois isolées les deux fractions de quartz que nous nous sommes proposés d'utiliser dans l'analyse de la datation (de 4 à 11  $\mu\text{m}$ , respectivement de 63 à 90  $\mu\text{m}$ ), nous sommes passés au stade de la préparation des aliquotes.

##### 9.2.3.3.1. Les aliquotes de la fraction fine (4 – 11 $\mu\text{m}$ )

Dans le cas des granulés fins, leur manipulation a été effectuée en suspension dans l'acétone ( $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ ) pour éviter la floculation. Les aliquotes de la fraction fine sont composées du matériel déposé sur des disques en aluminium de 10 mm de diamètre. Pour ce faire, nous avons pipeté 1 ml de granulés en suspension (2 mg de granulés / 1 ml d'acétone) sur chaque disque, au total quelque dizaines de disques ayant été préparés. Avant le pipetage, la solution a été homogénéisée dans un bain à ultrasons. Après avoir recouvert les disques d'un film d'acétone chargé de granules, les aliquotes ont été laissées à l'étuve à 50°C pour évaporer le liquide. À la fin, les aliquotes séchées ont été placées dans une boîte opaque et transférées dans la chambre à mesures de luminescences où elles ont été stockées dans une armoire étanche à la lumière.

#### 9.2.3.3.1. Les aliquotes de la fraction grossière (63 – 90 µm)

Pour les particules grossières, des disques en acier inoxydable d'un diamètre de 10 mm et d'une épaisseur de 0,5 mm ont été utilisés. Sur chaque disque, les granulés grossiers ont été déposés sous forme sèche, l'adhérence à la surface des disques étant assurée par pulvérisation d'une huile de silicone. Pour obtenir des aliquotes, les étapes suivantes ont été suivies :

- Le quartz a été préparé sur une feuille d'aluminium ;
- Chaque disque a été manipulé manuellement avec une pince de laboratoire et passé à travers le gros quartz sur la feuille d'aluminium pour que les granules se fixent côté huile ;
- Le côté opposé du disque a été nettoyé en le balayant avec la pince sur un mouchoir en papier ;
- Chaque aliquote a été fixée au carrousel à des positions prédéterminées.

#### 9.2.3.4. La détermination de la dose équivalente

##### 9.2.3.4.1. La technique utilisée pour la détermination de la dose équivalente

Le long de son évolution, la technique de datation par luminescence stimulée optiquement a connu de nombreux protocoles d'analyse. Tous les protocoles sont basés sur la lecture du signal luminescent des cristaux sur des aliquotes. Jusqu'en 1990, des procédures à aliquotes multiples étaient utilisées. [Timar - Gabor et al. \(2013\)](#) mentionnent plusieurs techniques à aliquote unique telles que la procédure additive (MAAD) et les techniques de régénération (MARD). Dans notre étude, une procédure plus récente basée sur un protocole uni – aliquote régénératif (SAR) a été mis en place. Ce protocole uni – aliquote régénératif (SAR) est la méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la dose équivalente ( $D_e$ ) [[Murray et Wintle \(2000\)](#); [Murray et Wintle \(2003\)](#)]. L'avantage de cette méthode est que chaque aliquote peut être utilisée séparément de manière analytique pour déterminer une dose équivalente. En estimant la dose équivalente sur la base des résultats de la plupart des aliquotes, une série de conditions spécifiées par [Timar-Gabor et al. \(2013\)](#) sont à respecter<sup>45</sup>.

Les mesures de luminescence ont été effectuées avec un appareil de type Risø TL / OSLDA-12 équipé de diodes IR ( $830 \pm 10$  nm) et de diodes LED bleues ( $470 \pm 30$  nm). Le signal luminescent a été mesuré par stimulation à la diode bleue (puissance optique de 90%) pendant 40s et la luminescence émise a été détectée avec un photomultiplicateur ET-PDM9107-CP-TTL à l'aide de filtres Hoya U-340. La dose équivalente est en outre calculée en comparant les signaux luminescents naturels aux signaux générés artificiellement, obtenus à l'aide d'une source de radio-isotopes calibrée, généralement une source bêta de  $^{90}\text{Sr}$  /  $^{90}\text{Y}$  [[Timar et al. \(2011\)](#); [Vasiliniuc \(2011\)](#); [Constantin et al. \(2012\)](#)]. L'instrument de mesure s'appelle « Reader » et le dispositif sur lequel les aliquotes à mesurer se mettent s'appelle « le carrousel ».

Après avoir préparé les aliquotes sur les deux fractions (4-11µm, respectivement 63-90 µm), elles ont été montées sur le carrousel afin de prendre les mesures. Sur le carrousel, le nombre maximum de positions pouvant être occupées par les aliquotes est de 48. Puisque nous partons du principe que les trois échantillons prélevés à une profondeur proche (170 – 200 cm de la surface du profil vertical) appartiennent plus ou moins à la même couche, l'objectif était d'obtenir un résultat global de l'âge de la couche située à la base de la tranchée. De plus, nous voulions connaître l'âge des sédiments en général, afin de confirmer

---

<sup>45</sup>Pour plus de détails, voir Timar-Gabor et al. (2013), pag. 307



chronologiquement la stratigraphie au-dessus de la zone d'échantillonnage en vue de la datation. Ainsi, seule la présentation de l'âge des trois échantillons vise leur médiation ou leur confirmation croisée, et non la détermination d'une séquence stratigraphique. En conséquence, pour les mesures effectuées sur la base des trois échantillons, P1, P2 et P3 (disposés dans cet ordre en partant de bas vers le haut – revoir la **Figure IX.22**), un nombre différent d'aliqotes a été utilisé en fonction de l'échantillon. Cela a commencé avec l'échantillon P1 pour lequel la plupart des mesures ont été effectuées ; pour les autres échantillons, le nombre d'aliqotes a été ensuite déterminé en fonction du besoin de corrélation ou de confirmation de l'âge trouvé à la première couche.

#### 9.2.3.4.2. Le développement du protocole SAR

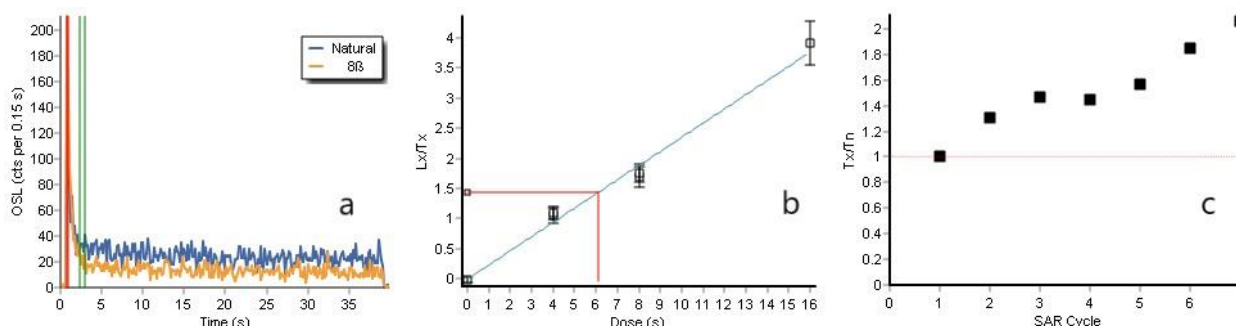
Les étapes de stimulation et les paramètres du protocole SAR sont présentés dans le **Tableau IX.5**:

**Tableau IX.5.** La séquence du protocole SAR utilisé pour les aliqotes de la tranchée de Podari

Pas	Traitement	Signal mesuré
1	Irradiance, Dose $D_i$	-
2	Préchauffage/ Preheat TL (200°C pendant 10s)	-
3	Stimulation OSL ~ 40s à 125°C	$L_i$
4	Irradiance, Dose teste $D_t$	-
5	Chauffage/ Cutheat TL à 160°C	-
6	Stimulation OSL ~40s à 125°C	$T_i$
7	Stimulation OSL ~40s à 280°C	-

TL=Thermoluminescence

Dans le premier cycle, en première étape, l'aliqote est préchauffée et ensuite la dose naturelle ( $D_0$ ) est mesurée. L'aliqote est ensuite irradiée à une dose test, chauffée et le signal luminescent à la dose teste ( $D_t$ ) est mesuré. Le deuxième cycle commence avec l'irradiation de l'aliqote avec une dose régénérative ( $D_r$ ). Ensuite elle est chauffée à une température inférieure que celle du préchauffage et le signal OSL est mesurée dans les mêmes conditions que dans le premier cycle. Le cycle régénératif se répète 3 à 4 fois avec la modification de la valeur de la dose test (0,35 Gy ; 0,7 Gy ; 1,4 Gy, dans tous les cas et dés fois à 1,3 Gy ou 3 Gy) en fonction de la granulométrie utilisée. Les mesures à différentes doses test sont ensuite plotées pour obtenir une courbe de croissance du signal, sur laquelle la valeur du signal luminescent naturel puisse être interpolée pour obtenir la dose équivalente –  $D_e$  (**Figure IX.16**).



**Figure IX.16.** Exemple de résultat préliminaire d'un cycle SAR d'une aliqote acceptée (P1, 63 – 90  $\mu\text{m}$ ) : a – l'évolution du signal OSL; b – L'interpolation de la dose estimée en fonction des doses régénératives ; c – le rapport  $T_x/T_n$  le long du cycle SAR

Les 40 s de stimulation sont divisés en 260 canaux, dont les 5 premiers ne fonctionnent pas et le signal net est émis dans les 0,308 premières secondes de stimulation, soit 2 canaux. La limite d'intégration du signal de fond est comprise entre les canaux 16 et 20, c'est-à-dire entre 0,924 s et 3,08 s. Sur la **Figure**

**IX.16.a.**, le signal net se trouve entre les verticales rouges et le signal de fond entre les verticales vertes. Le signal diminue bien vers la seconde 40. Sur la **Figure IX.16.b.**, la courbe de croissance en fonction de la dose est présentée (ajustement linéaire de la fonction). Le signal naturel est bien en dessous du niveau de la courbe de saturation. La dose équivalente a pu être interpolée à l'aide de la ligne rouge à une valeur de  $6,09 \text{ s} \pm 0,9 \text{ s}$  a été obtenue (soit  $0,57 \text{ Gy} \pm 0,08 \text{ Gy}$ ). Enfin, la **Figure IX.16.c.** montre le rapport  $T_x/T_n$  de la séquence du cycle SAR.

Le protocole SAR est évalué par trois tests de laboratoire. Ils utilisent les données générées dans la construction de la courbe dose – réponse, en remesurant au moins un point régénéré :

- Le teste déplétion IR (IR Déplétion)
- Le teste de répétition/ recyclage de la dose (Recycling test)
- Le teste de récupération du signal OSL (Récupération test)

Tout échantillon sédimentaire ou géologique peut contenir, outre le quartz, une quantité imprévisible de feldspath et d'autres minéraux. La pureté de chaque aliquote a été vérifiée par des tests de déplétion IR. Le test de pureté du quartz vérifie que le signal du quartz n'a pas été influencé par le feldspath. Le test consiste à rapporter le signal OSL mesuré avec et sans stimulation pré-infrarouge et porte le nom "**Déplétion IR**". L'existence d'un signal qui dépasse le niveau de fond, suite à une stimulation lumineuse dans le spectre infrarouge, est attribuée à la contamination par le feldspath. Cela est possible car à la température du milieu ambiant, la composante rapide du signal luminescent optiquement stimulé du quartz ne s'active pas dans IR, tandis qu'une grande variété de feldspaths émet des réponses en UV à l'excitation avec IR [Krbetschek (1995), cité par Timar – Gabor *et al.* (2013)].

La performance du protocole SAR appliqué aux échantillons étudiés a été testée en termes de recyclage et de récupération du signal. Le test de recyclage (**Recycling test**) consiste à mesurer le signal luminescent généré par une dose régénérative inférieure de la dose équivalente estimée, suivi par une croissance graduelle des doses régénératives jusqu'à une valeur considérée supérieure à la dose équivalente estimée [Timar – Gabor *et al.*, 2013]. Le signal luminescent est ensuite mesuré dans le cas d'une dose régénérative nulle puis d'une des doses régénératives précédentes. Si le rapport de répétition de deux points est entre 0,9 et 1, le protocole SAR est considéré accepté [Wintle et Murray, 2000].

La stimulation de 40s au début de la mesure joue un rôle assez important pour la stimulation de l'émission des électrons dans les pièges OSL du réseau cristallin. Le test de récupération du signal (**Recuperation test**) se fait par la mesure d'une dose régénérative de 0s, après la dose maximale, pour surprendre le signal luminescent non nul.

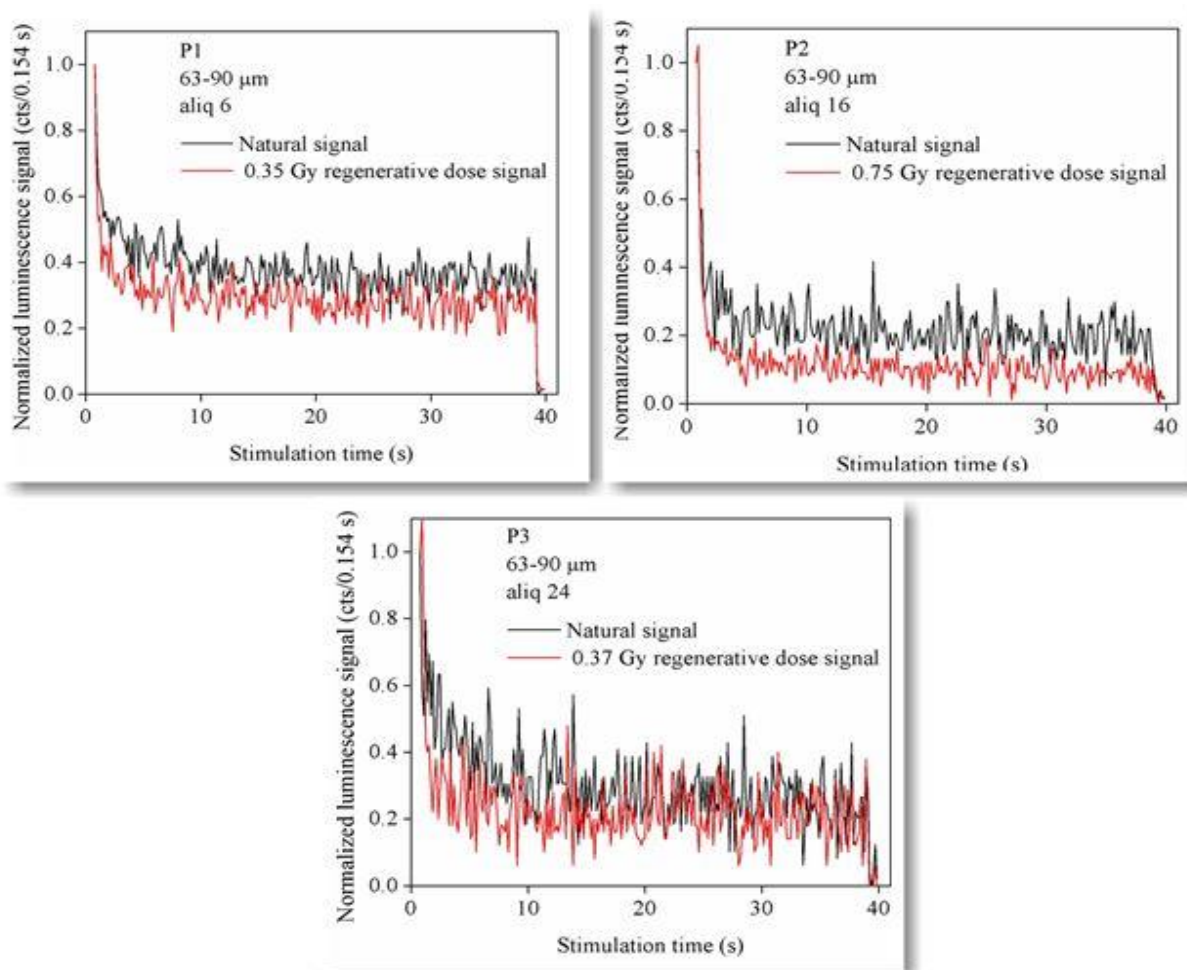
Au final, dans l'évaluation des 3 tests, des aliquotes ont été acceptées si les ratios de recyclage et les ratios de déplétion IR ne dépassaient pas 10% d'écart par rapport à l'unité et si les courbes de croissance étaient proches de l'origine (valeurs de récupération inférieures à 2% du signal naturel).

## 9.2.4. Résultats de la datation par OSL

### 9.2.4.1. Estimation de la dose équivalente

Les trois courbes de décroissance de la réponse OSL de la **Figure IX.17** ont été sélectionnées à partir d'une aliquote de chacun des trois échantillons de sédiment ( $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$ ). Elles montrent la réduction rapide du signal naturel et régénéré durant la stimulation.

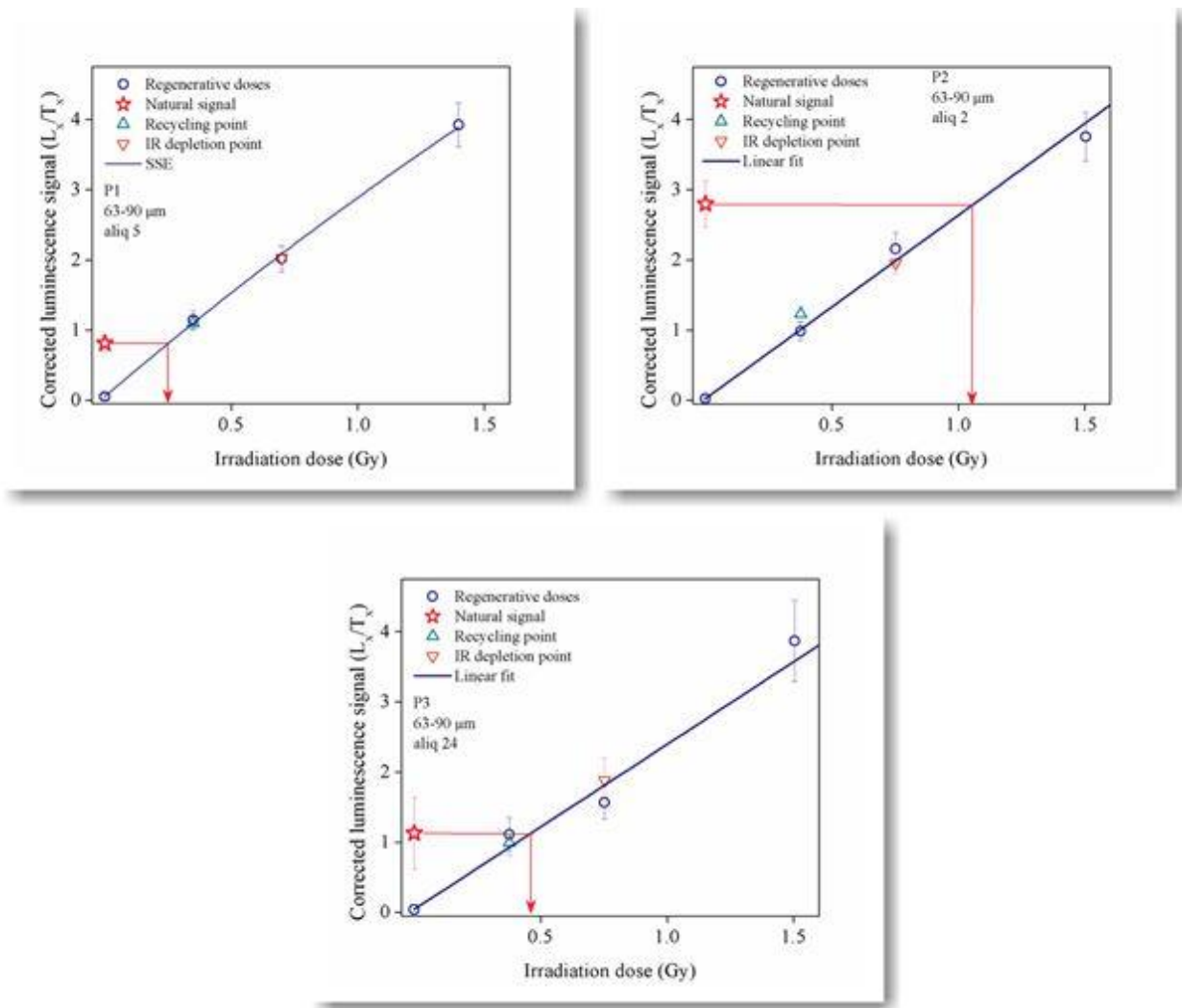
Après avoir mesuré le signal naturel, la dose équivalente est obtenue en interpolant la réponse naturelle sur la courbe dose-réponse.



**Figure IX.17.** Les courbes de réponse du signal OSL (naturel et régénératif) de trois aliquotes représentatives des échantillons, P1, P2, P3

Dans le calcul de la dose équivalente ( $D_e$ ) le protocole SAR ne considère que la partie initiale du signal OSL des premiers canaux de stimulation, ce signal faisant partie de la "composante rapide" [Bailey *et al.* (1997); Timar - Gabor *et al.* (2013)]. Dans le calcul de cette dose équivalente, la courbe de croissance du signal OSL a été utilisée, en fonction des doses établies pour le quartz sédimentaire grossier (63-90 μm) selon le protocole SAR (**Figure IX.18**). Les points régénérés ont été rendus par des cercles bleus, ceux issus des tests de recyclage ont été représentés par des triangles verts et ceux du test de déplétion IR sous forme de triangles rouges. Tous ces points ont été ajustés par des fonctions linéaires. Enfin, le signal naturel a été représenté par une étoile rouge sur l'axe des ordonnées (le signal luminescent corrigé  $L_x/T_x$ ) et interpolé sur la base de la courbe de croissance, pour obtenir le signal naturel exprimé en Gray.

Les doses équivalentes ont été représentées par des flèches rouges. On constate que même pour cette combinaison d'aliquotes autres que celles choisies pour représenter la courbe de réponse du signal OSL, il s'avère que la dose équivalente se situe dans une moyenne d'environ 0,5 Gy.



**Figure IX.18.** Les courbes de réponse en fonction de la dose régénérative des signaux OSL pour les échantillons P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>. Dans les trois cas, le signal naturel est bien en dessous du niveau de la courbe de saturation. Des aliquotes représentatives des trois échantillons ont été sélectionnées pour la démonstration

Le **Tableau IX.4** met en évidence les résultats des mesures et des calculs effectués pour estimer la dose équivalente.

**Tableau. IX.4.** Synthèse des données portant sur l'estimation de la dose équivalente ( $D_e$ ), des taux du test de déplétion IR, du test de répétition de la dose et du test de récupération du signal

Echantillon	Fraction granulométrique ( $\mu\text{m}$ )	Dose équivalente moyenne (Gy)	No. d'aliquotes acceptées <sup>46</sup>	Le test de répétition de la dose	Le test de déplétion IR	Le test de récupération du signal (%)
P1	63 - 90	$0.61 \pm 0.04$	32/46	$0.98 \pm 0.03$	$0.96 \pm 0.12$	$1.88 \pm 0.4$
P2	63 - 90	$0.6 \pm 0.11$	10/16	$1.01 \pm 0.06$	$0.9 \pm 0.07$	$1.46 \pm 0.5$
P3	63 - 90	$0.53 \pm 0.12$	8/16	$0.93 \pm 0.13$	$0.98 \pm 0.08$	$5.12 \pm 2.6$

#### 9.2.4.2. Résultats sur la dose annuelle

On se rappelle que pour déterminer l'âge par l'OSL, deux paramètres doivent être connus : *la paléodose*, ou la dose accumulée depuis la dernière exposition à la lumière (réinitialisation du signal OSL) et *la dose annuelle*, ou le taux d'accumulation du signal [Timar - Gabor *et al.*, 2013]. Dans le sous-chapitre

<sup>46</sup> Le nombre d'aliquotes acceptées doit être rapporté sur le nombre total d'aliquotes analysées

précédent, on a déterminé les doses équivalentes des trois échantillons (P1, P2 et P3), en gardant seulement les résultats pour la fraction grossière, qui semblaient être plus pertinents.

La dose annuelle est en fait le débit de l'absorption de l'énergie du flux naturel existant dans le milieu environnant. On a vu dans le chapitre §8.3.1 quels sont les familles radioactives auxquelles appartiennent les radionucléides qui émettent les radiations  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . On s'intéresse également par la radiation cosmique.

Dans le laboratoire, la détermination des contributions des isotopes radioactifs au débit de la dose s'est faite en utilisant la méthode de la matrice infinie, proposée par Aitken (1985). Cette méthode calcule l'énergie émise sur l'unité de masse et de temps, en partant de la concentration de différents isotopes trouvés dans un échantillon et de la demi-vie des radioéléments.

En utilisant la partie des têtes de tubes des échantillons, il a été possible de savoir la contribution au débit de la dose annuelle des isotopes radioactifs. Le matériel des extrémités des tubes des trois échantillons a été utilisé dans le laboratoire de spectroscopie gamma pour déterminer le contenu en radio-isotopes. Les radioéléments identifiés pour chaque échantillon et leur contribution (Bq/Kg) ont été consignés dans le tableau final des contributions au débit de la dose annuelle (*Tableau IX.7*). En outre, la dose cosmique a été calculée en fonction des coordonnées géographiques du site d'échantillonnage, de l'altitude absolue au-dessus du niveau de la mer et de la profondeur à laquelle les échantillons ont été prélevés. Enfin, dans le calcul de la dose annuelle, la teneur en humidité des échantillons a également été prise en compte, ce qui a une influence sur la quantité d'énergie ionisante pouvant être absorbée par le sédiment (le coefficient d'absorption pour les trois types de rayonnement,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , est plus élevé pour l'eau que pour les silicates).

Une fois la dose annuelle calculée ( $D_a$ ), il a été possible de déterminer l'âge, en rapportant la dose équivalente ( $D_e$ , §9.2.4.1.) au débit de dose  $D_a$  :

$$\hat{\text{Age}} [\text{Ka}] = \frac{D_e [\text{Gy}]}{D_a [\text{Gy} / \text{Ka}]}, \text{ soit}$$

$$\hat{\text{Age}} = \frac{D_e}{\text{Contribution cosmique (Dc)} + \text{Contribution interne (D}\alpha + \text{D}\beta) + \text{Contribution effective (D}\beta + \text{D}\gamma)}$$

Dans le *Tableau IX.5* nous avons présenté les résultats sur les contributions des deux familles de radioisotopes ( $^{238}\text{U}$  -  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$ ), dont les radioéléments ont été utilisées dans différentes équations pour calculer la dose annuelle ( $D_a$ ).

**Tableau IX.5.** Synthèse des données portant sur les contributions au débit de la dose annuelle des échantillons P1, P2 et P3 (fraction 63 – 90  $\mu\text{m}$ ), ainsi que les erreurs aléatoires ( $\sigma_r$ ) et systématiques ( $\sigma_s$ )

Echantillon	Fraction granulométrique ( $\mu\text{m}$ )	Profondeur (cm)	Dose équivalente (Gy)	No. d'aliquotes acceptées	Umidité (%)	Dose cosmique (Gy/ka)
P1	63 - 90	200	0.61 $\pm$ 0.04	32/46	20 $\pm$ 0.5	0.168 $\pm$ 0.025
P2	63 - 90	190	0.60 $\pm$ 0.11	10/16	20 $\pm$ 0.5	0.170 $\pm$ 0.025
P3	63 - 90	170	0.53 $\pm$ 0.12	6/16	20 $\pm$ 0.5	0.174 $\pm$ 0.026

Echantillon	$^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$ (Bq/Kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/Kg)	Dose annuelle (Gy)	Erreur aléatoire (%)	Erreur systématique (%)	Age (ka)
P1	65.2 $\pm$ 0.8	48.7 $\pm$ 0.6	3.16 $\pm$ 0.06	6.8	7.8	<b>0.19 <math>\pm</math> 0.02</b>
P2	55.6 $\pm$ 0.9	49.4 $\pm$ 0.3	3.20 $\pm$ 0.05	18.4	7.8	<b>0.19 <math>\pm</math> 0.04</b>
P3	45.2 $\pm$ 0.5	41.2 $\pm$ 0.5	2.63 $\pm$ 0.05	22.7	7.7	<b>0.20 <math>\pm</math> 0.05</b>



Les erreurs aléatoires dans les mesures expérimentales sont causées par des modifications inconnues et imprévisibles. Ces changements peuvent être produits par les instruments de mesure ou à cause des conditions environnementales.

Les erreurs systématiques dans les observations expérimentales proviennent généralement des instruments de mesure. Ils peuvent se produire à cause des problèmes de l'instrument ou du système de traitement de données.

Toutes ces erreurs ont été déterminées automatiquement dans le logiciel RISO.

## 9.2.5. Interprétation des résultats, conclusions et perspectives

Les résultats obtenus (*Tableau IX.7*) montrent que l'âge des sédiments (en ka convertis en années) est similaire pour les trois échantillons, les valeurs étant d'environ  $190 \pm 30$  ans. Ce que nous avons acquis grâce à cette série de méthodes de datation montre que les sédiments de la base du profil alluvial de Podari sont relativement jeunes. Néanmoins, nous nous attendions à des âges encore plus jeunes, à des décennies, à moins de 100 ans. Les nouveaux résultats nous amènent à repenser le problème de recherche et le contexte hydraulique et géomorphologique de la formation de ces dépôts sédimentaires, ce qui a conduit aux hypothèses et conclusions suivantes qui restent dans la perspective de cette thèse de doctorat :

**1.** Les sédiments ont été prélevés dans la couche de base du dépôt alluvial. Il est possible que l'hypothèse initiale selon laquelle la sédimentation est très jeune (jusqu'à 50 ou 60 ans) ne serait pas tout à fait vraie pour les bases couches (les plus anciennes). Nous pouvons en tirer les conclusions et les axes de recherche suivants pour le chapitre §9 de la thèse :

**1.1.** L'âge récent attendu pourrait être valable que pour les couches supérieures (4 à 6 premières).

Dans ce cas, l'identification des crues qui les ont déposées ne sera plus possible que pour une partie de ces couches.

**1.2.** Si la limite de la technique de datation OSL nous le permet, il mériterait de dater aussi une couche au milieu, située à quelques dizaines de centimètres au-dessus de celle que nous avons datée. Si nous trouvons des âges plus petits, cela signifie que le protocole SAR et la méthode OSL en général conviennent à la datation de dépôts très récents. Si l'âge est encore plus grand ou de la même valeur, la conclusion est qu'une autre méthode de datation devrait être employée dans le futur travail.

**1.3.** Si les sédiments sont plus anciens, il convient de reformuler l'hypothèse géomorphologique de la formation du site alluvial situé derrière la construction de la digue datant des années 1970. Nous n'excluons pas la possibilité que la couche que nous avons datée était en submersion et été déposée dans les années 1970 dans la zone située entre la digue et le lit mineur actuel de la rivière Jiu, dans des conditions de niveau général supérieur au niveau actuel.

**2.** Les résultats obtenus (sédiments fluviaux âgés d'à peu près de 200 ans) ne nous découragent pas de continuer à soutenir l'hypothèse de dépôts alluviaux créés par les fortes crues des 50 à 100 dernières années. Nous prenons également en compte les limitations techniques de la datation compte tenu de la dose équivalente que nous avons donnée aux mesures, qui ne peut pas être diminuée en dessous de 2 - 4 s. A cet argument, on peut ajouter l'effet de blanchiment partiel que les sédiments

fluviaux transportés très rapidement par une crue pourraient certainement en souffrir. Dans ces cas évoqués, nous pouvons formuler les conclusions et perspectives suivantes :

**2.1.** Les sédiments déposés par les crues récentes ne conviennent pas pour la datation OSL, que si le signal OSL précédent a été complètement réinitialisé. D'après nos vérifications dans le laboratoire, ces conditions semblaient réunies, mais nous nous réservons toujours le droit de considérer qu'une partie du signal à OSL élevé est due à ce fait, pas nécessairement à un âge plus élevé.

**2.2.** Suite aux travaux de laboratoire, mais aussi en explorant de manière visuelle la couche datée sur le terrain, au moment de l'échantillonnage, des traces de charbon ont été observées dans la composition de ces sédiments. On sait également que l'exploitation artisanale du charbon n'a commencé qu'après les premières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle (par la houille du bassin de Petroşani). L'exploitation industrielle, avec des effets possibles sur la qualité de l'eau et des sédiments, n'a été réalisée qu'au XIX<sup>e</sup> siècle, surtout après 1950. Ainsi, l'identification des traces de charbon dans la couche sédimentaire soumise à l'analyse de datation laisse à penser en effet, que les sédiments se sont déposés beaucoup plus tard qu'indiqué par l'âge selon la datation OSL. Ce n'est qu'en perspective que nous déterminons par la méthode de la différence de densité (comme au §8.2.5) des deux espèces de charbon existantes dans cette couche. Suite aux résultats, nous serons portés à croire dans l'une des deux hypothèses possibles :

**2.2.1.** S'il y a de la houille et du lignite, ou que du lignite, c'est la preuve indéniable que la couche sédimentaire est plus récente que 100 ans. Le lignite a commencé à être exploité pendant le régime communiste.

**2.2.2.** Enfin, s'il n'y a que de la houille, nous admettrons le faible risque que la couche ait plus de 100 ans (mais pas nécessairement 200 ans), puisque les premières exploitations ont commencé au XIX<sup>e</sup> siècle.

## Chapitre 10.

### Résultats finaux : quelles crues desquels bassins versant?

<b>10.1. Hypothèses sur l'estimation des côtes atteintes par les crues</b> .....	480
<b>10.1.1. La relation entre l'altitude des couches et la côte à l'échelle de la station hydrométrique de Podari</b> .....	480
<b>10.1.2. Sélection des crues susceptibles de déposer des couches sédimentaires</b> .....	484
<b>10.2. Les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval correspond-elle aux caractéristiques signalées en amont?</b> .....	488
<b>10.2.1. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval et échantillonnés en amont en utilisant la colorimétrie</b> .....	489
<i>10.2.1.1. Les caractéristiques des spectres colorimétriques des échantillons prélevés dans les zones sources de sédiments</i> .....	489
<i>10.2.1.2. Mise en place des modèles de classification des échantillons</i> .....	492
<i>10.2.1.3. Interprétation pour les possibles sources de sédiments et emploi futur</i> .....	501
<b>10.2.2. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval et échantillonnés en amont par l'analyse d'image</b> .....	503
<b>10.2.3. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval et échantillonnés en amont par la pétrologie organique</b> .....	504
<i>10.2.3.1. La réflectance (Rr)</i> .....	504
<i>10.2.3.2. L'analyse pétrographique</i> .....	508
<i>10.2.3.3. Synthèse de l'analyse pétrologique</i> .....	509
<b>10.2.4. Résultats des analyses géochimiques</b> .....	510
<i>10.2.4.1. Le contenu en charbon et la spéciation houille – lignite</i> .....	511
<i>10.2.5.2. La teneur en minéraux lourds et en lanthanides</i> .....	516
<b>10.3. La synthèse des possibles caractéristiques des zones sources de sédiments déposées à la tranchée alluviale de Podari</b> .....	521
<b>10.4. Retour sur les hypothèses initiales</b> .....	526
<b>Synthèse du chapitre</b> .....	527

## 10.1. Hypothèses sur l'estimation des côtes atteintes par les crues

Une partie importante du travail de mise en correspondance entre l'historique des crues et celui des dépôts correspond à la mise en relation des altitudes des couches sédimentaires avec les côtes à l'échelle limnimétrique de la station hydrométrique la plus proche. Pour cela, nous avons utilisé des profils en travers à la station hydrométrique de Podari, fournis par l'ABA Jiu et l'INHGA. Les relevés topographiques disponibles ont concerné uniquement les années 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2013 et 2014. Pour les autres années de la période d'étude (2002 – 2014) on ne dispose pas des profils en travers. Cela ne va pas poser des grandes difficultés, car les autres années avec des crues dont les débits de pointe ont été supérieurs à  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (2002, 2003 et 2004) sont moins importantes pour l'analyse qui met en premier plan les années les plus récentes.

La tranchée se situant à 295 m en aval de la station hydrométrique, deux solutions pour approximer son altitude apparaissent plus pertinentes :

- 1) On fait l'hypothèse que l'altitude de la berge droite qui correspond à la côte à l'échelle vis-à-vis de la station de mesure se conserve le long du linéaire 295 m jusqu'à l'endroit de la tranchée ;
- 2) On estime l'altitude correspondante en aval (de la berge où la tranchée  $T_{\text{aval}}$  se trouve) en utilisant un profil en travers à cet endroit, pour lequel la côte à l'échelle de la station en amont est marquée.

*La première solution* est la plus simple et pourrait être implémentée pour calculer l'altitude au droit de la tranchée, chaque année où nous disposons des profils en travers. L'inconvénient est qu'elle ne tient pas compte des différences introduites par la pente en profil longitudinal. Nous gardons cette solution par défaut pour toute vérification et mise en correspondance ultérieure.

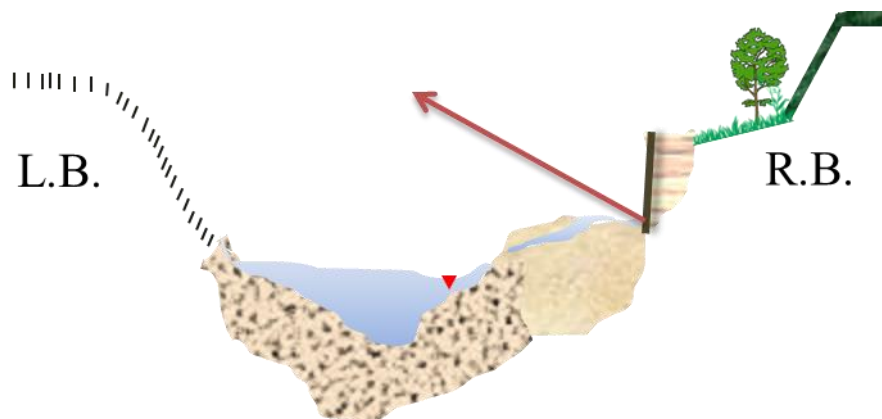
*La deuxième solution* peut être mise en œuvre seulement s'il existe aussi un profil en travers supplémentaire en aval de la station hydrométrique. Nous disposons uniquement pour l'année 2017 d'un tel profil à 250 m aval de la station Podari et 45 m en amont de la tranchée. La tranchée a été faite la même année (9 juin 2017), ce qui nous permet ainsi d'essayer de trouver l'altitude correspondante de la berge 250 m aval de la station. Ce profil supplémentaire, étant très proche, nous permet de mieux estimer l'altitude de la berge à l'endroit de la tranchée, correspondante aux côtes à l'échelle limnimétrique de la station de Podari.

### 10.1.1. La relation entre l'altitude des couches et la côte à l'échelle de la station hydrométrique de Podari

Avant de procéder à l'estimation de l'altitude de chaque couche, nous avons commencé par estimer l'altitude au sommet de la tranchée. Pour ce travail, la première solution a été d'utiliser des profils en travers de l'année de réalisation de la tranchée (une image satellitaire de 18 août 2017, la plus proche date du jour quand la tranchée a été creusée), permettant à localiser les deux profils en travers qu'on va appeler dorénavant C-C' (celui à la station hydrométrique), respectivement D-D' (celui situé 250 m plus en aval). Les différences de distance et d'altitude entre les deux sources de données (le profil en travers et les images satellitaires) sont quand même considérables et il a fallu que nous tenions compte de cette limite dans l'approximation de l'altitude au droit de la tranchée. Les profils en travers issus des images satellitaires,

même s'ils sont grossiers, ont servi pour se repérer en espace, afin de créer une liaison avec l'altitude à la tranchée.

La procédure suivante a consisté dans le traçage d'une perpendiculaire entre le point de coordonnées mesurées au site de la tranchée et les profils en travers C-C' et D-D'. Ensuite, des profils en long ont été construits, pour connaître la pente et la différence d'altitude entre la tranchée et les points correspondants (*Figure X.1*).



**Figure X.1.** La géométrie de la correspondance entre les profils en travers et le site de la tranchée

Nous avons ainsi estimé une altitude de 70,3 m au sommet de la tranchée, ce qui correspond à l'altitude du toit de la plus récente couche ( $L_{11} - 235$  cm au-dessus du niveau de l'eau le 9 juin 2017, équivalent à 114 cm sur la côte à l'échelle limnimétrique de C-C' le même jour). Avec ce résultat, on a été capable d'ajuster l'altitude au droit de la tranchée par rapport à l'altitude à l'échelle limnimétrique qui correspond à différents niveaux maximaux de l'eau lors des crues analysées. Le *Tableau X.1* résume les caractéristiques hydrologiques et topographiques des crues à la station de Podari. Pour les années 2008, 2003 et 2002, en ne disposant pas de profils en travers, il n'est pas possible de calculer l'altitude équivalente. Nous verrons que cela ne pose guère de problème, car la crue de l'année 2008 n'a pas été très forte et le plus probablement la dernière couche déposée avant 2008 n'a pas été submergée par cette crue ( $Q_{max} \sim 617$   $m^3s^{-1}$ ). Pendant les premières deux années, il est tout à fait possible qu'au moins une crue (sans doute de l'année 1991 avec la crue de juillet assez forte) a été susceptible d'atteindre un niveau au-dessus de la berge, afin de déposer les sédiments. Nous prenons cette limite de l'analyse, et nous arrêterons avec l'analyse au niveau de l'année 2004, en énonçant les incertitudes existantes.

**Tableau X.1.** Caractéristiques des crues de la rivière Jiu susceptibles à déborder à Podari

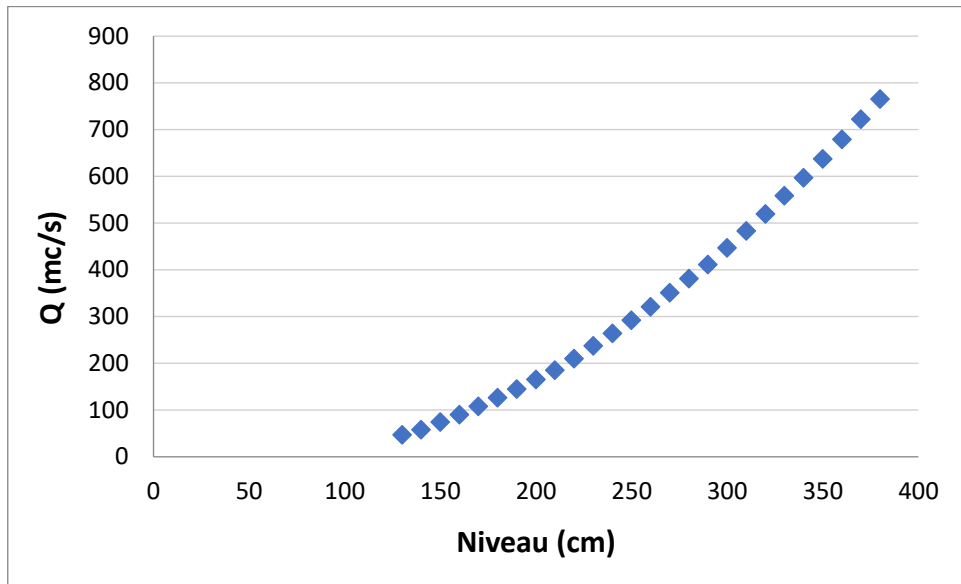
	Date début	Date fin	Durée (j)	$Q_{max}$ ( $m^3s^{-1}$ )	$T_{retour}$ (ans)	Côte à l'échelle (cm) pour $Q_{max}$	Alt (m) à l'échelle	R (kg/s) (jr.max)	$R_{(jr.max-1)}$ (kg/s)
1	02/12/2014	17/12/2014	16	1074	10.4	404	<b>70.37</b>	925	880
2	23/10/2014	31/10/2014	9	743	3.5	332	70.01	765	485
3	27/07/2014	06/08/2014	11	855	5.3	357	70.14	855	790
4	14/05/2014	25/05/2014	12	944	7.1	376	70.23	990	580
5	03/05/2014	11/05/2014	9	859	5.4	357	70.14	950	900
6	24/04/2014	30/04/2014	6	847	5.3	355	70.13	940	815
7	17/04/2014	23/04/2014	7	895	6	368	<b>70.19</b>	925	555
8	03/03/2014	13/03/2014	11	809	4.5	346	70.08	735	505



9	30/03/2013	18/04/2013	20	1270	17.2	453	71.61	1417	1240
10	09/03/2013	21/03/2013	13	766	3.8	337	70.33	1034	590
11	25/02/2013	04/03/2013	8	622	2	316	70.10	390	275
12	18/02/2010	26/02/2010	9	736	3.4	373	70.78	765	605
13	08/11/2009	19/11/2009	12	743	3.5	375	69.84	530	461
14	28/01/2009	05/02/2009	9	813	4.5	435	70.35	950	646
15	18/12/2008	26/12/2008	9	617	2	402	-	820	655
16	16/11/2007	26/11/2007	11	966	7.6	485	71.76	675	575
17	23/10/2007	01/11/2007	10	786	4.1	440	71.31	620	599
18	23/03/2007	02/04/2007	11	651	2.3	403	70.67	575	590
19	11/04/2006	19/04/2006	9	830	4.8	445	70.86	630	807
20	10/03/2006	21/03/2006	12	1022	9	490	71.31	1022	635
21	15/08/2005	03/09/2005	20	875	5.7	476	71.61	3930	232
22	10/07/2005	20/07/2005	11	750	3.6	426	71.14	1635	1490
23	14/11/2004	26/11/2004	13	834	4.9	446	70.67	326	1745
24	08/11/2004	13/11/2004	6	692	2.2	413	70.43	1400	1010
25	27/02/2004	07/03/2004	10	671	2.1	408	70.4	1445	35
26	13/04/2003	25/04/2003	13	713	3.1	428	-	204	10
27	03/12/2002	14/12/2002	12	640	2.2	409	-	598	372

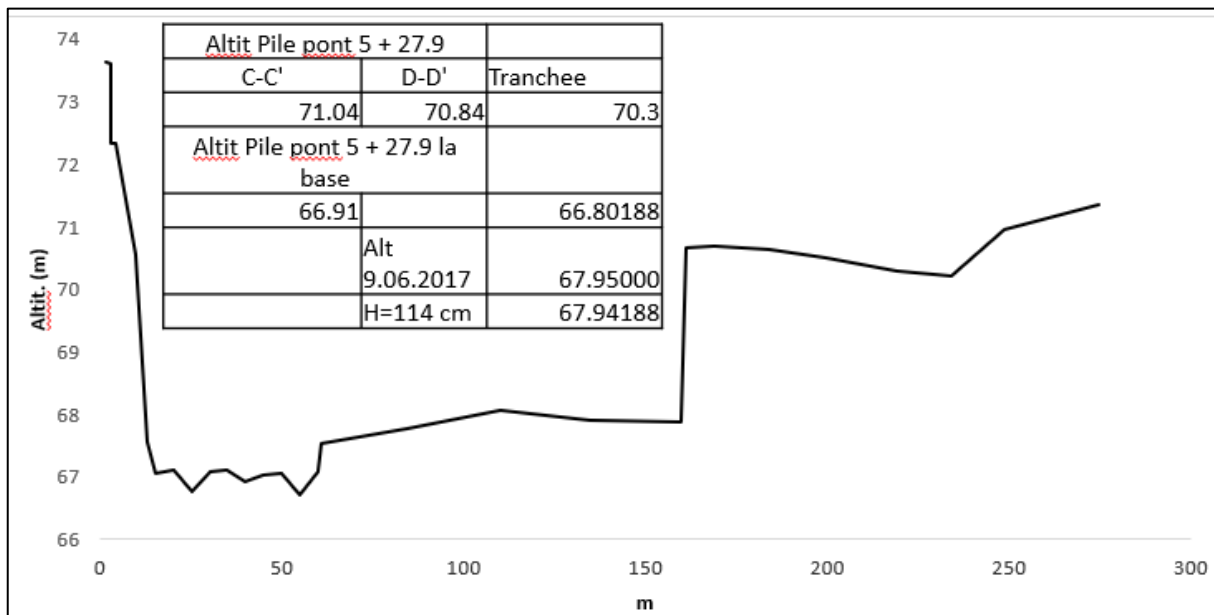
Les jours de débit de pointe, l'altitude correspondante à la côte à l'échelle apparaît dans la plupart des cas marquée sur les profils en travers. Pour les jours de débits de pointe des crues qui ne disposaient pas de relevés topographiques, l'altitude a été calculée par interpolation linéaire, à partir des altitudes connues, mesurées dans les jours des relevés topographiques. Dans chaque année, au moins deux profils en travers et deux altitudes équivalentes des côtes à l'échelle ont été disponibles.

Le pas suivant a été de calculer l'altitude équivalente à la côte à l'échelle du débit de pointe de chaque crue pour le site de la tranchée. Il faut bien préciser qu'au niveau de la topographie au droit de la tranchée, aucune des deux solutions ne seront en mesure de résoudre l'incertitude liée aux changements de morphologie entre les deux rives de la Jiu, où se trouve la station hydrométrique et respectivement celui de la tranchée (pour laquelle nous ne disposons pas de relevés topographiques). En effet, la morphologie du lit change d'une année à l'autre et même plusieurs fois durant l'année, surtout entre deux épisodes de crues. Il a été possible d'observer cette dynamique au chapitre §7.2, quand nous avons présenté la morphologie de la tranchée sur les images multi temporelles. Toutefois, la berge d'accumulation nous a semblé stable dans tous les cas et, par conséquent, une altitude d'un point de coordonnées connues (comme c'est le sommet de la tranchée), estimée au niveau de l'année 2017, doit correspondre à la même altitude pour une autre année dans le passé. Le même raisonnement s'applique pour tout autre niveau inférieur, comme par exemple les altitudes des couches alluviales, pour lesquelles il a été possible d'assigner les intervalles des hauteurs à l'échelle à la station de Podari et d'établir un débit minimal à atteindre (*Figure X.3*).



**Figure X.2.** La courbe de tarage réalisée pour la section de la tranchée  $T_{\text{aval}}$  et les débits minimaux à atteindre pour déposer chaque couche

L'altitude de la base de la tranchée, correspondante à celui de la côte « 0 » à l'échelle limnimétrique a été calculée à l'aide de la pente entre les deux points. La pente entre le profil en travers à la station hydrométrique de Podari et une section transversale parallèle au droit de la tranchée est de 0,358‰, ce qui vaut  $0,201^\circ$ . Nous notons cet angle avec  $\alpha$  et il sera utilisé chaque fois pour calculer l'altitude à la tranchée correspondante à une côte à l'échelle limnimétrique à la station de Podari (295 m en amont). Cette référence sera utile pour calculer aussi l'altitude de la base de chaque couche sédimentaire. La procédure de calcul de l'altitude à la base de la tranchée, qui correspond à la côte « 0 » à l'échelle limnimétrique est schématisée dans la **Figure X.3**.



**Figure X.3.** Estimation de l'altitude équivalente à la côte « 0 » à l'échelle limnimétrique, pour la section de la tranchée  $T_{\text{aval}}$ , 295 m en aval de la station hydrométrique de Podari

Par la première méthode, nous sommes arrivés ainsi d'estimer l'altitude au sommet de la tranchée de ~70,3 m, lorsque la deuxième méthode a donné une altitude à la base de la tranchée (correspondante de la côte « 0 » à l'échelle) de 66,804 m. Sur le terrain nous avons mesuré une hauteur de la tranchée de 235

cm au-dessus de la surface libre à ce jour-là, qui correspondait à 114 cm à l'échelle limnimétrique. Cela nous permet d'estimer l'altitude de la base de la tranchée à ~67,94 m, tandis que l'altitude obtenue en abaissant les 235 cm de l'altitude depuis le sommet de la tranchée est à peu près identique, d'environ ~67,95 m. Nous pouvons en déduire que les deux méthodes d'estimation de l'altitude de la base de la tranchée et de sa partie supérieure sont fiables et se valident mutuellement. Par conséquent, à partir de ces valeurs nous avons estimé le niveau d'eau que les crues auraient dû dépasser afin de déposer des nouvelles couches de sédiments. Pour cela, la même démarche a été appliquée afin de savoir l'altitude au droit de la tranchée de la côte à l'échelle limnimétrique pour chaque débit de point des crues sélectionnées. À partir des profils en travers disponibles, l'altitude à la tranchée, correspondant à la côte du niveau d'eau à la station hydrométrique, a été estimée pour chaque année d'analyse, mais les incertitudes existent lors de l'estimation de la pente. Ce problème est dû au fait que tous les profils topographiques ne fournissent pas les valeurs de la pente sur une certaine longueur en amont et en aval de la station hydrométrique. Les années où il n'y avait pas d'imagerie satellitaire, nous n'avons pas pu combler cette lacune en estimant la pente par traitement d'image.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous servir de ces altitudes pour les comparer avec l'altitude de la base de chaque couche, afin de vérifier quelles crues sont susceptibles d'avoir débordé.

### 10.1.2. Sélection des crues susceptibles de déposer des couches sédimentaires

Au chapitre précédent, nous avons estimé les altitudes absolues de chaque couche (à la fois leurs base et toit). Ces valeurs d'altitude nous ont servi pour la comparaison avec l'altitude équivalente pour chaque niveau maximal de l'eau atteint lors des crues initialement sélectionnées par la méthode de seuillage du débit (§7.2).

Cette étape d'analyse a comporté deux stratégies. La *première stratégie* a supposé la vérification de la correspondance des couches de la tranchée avec les crues par ordre chronologique, en commençant par les plus anciennes. Cela nous a permis d'établir des groupes de crues qui auraient pu correspondre au critère de l'altitude, la plus ancienne étant supposée comme ayant eu la priorité pour déposer, alors que les suivantes auraient dû atteindre un niveau supérieur à celle-ci pour déborder sur la nouvelle couche déposée par la précédente. Par cette stratégie nous éliminons les crues plus récentes qui correspondent bien du point de vue topographie – côte à l'échelle, mais qui n'ont pas eu un débit suffisamment grand pour dépasser la précédente.

La mise en œuvre de cette première stratégie a beaucoup réduit le nombre de crues et a mis en évidence surtout le fait que les plus récentes crues (des années 2013 et 2014), même si elles ont été caractérisées par de forts débits de période de retour >5 ans, les côtes à l'échelle correspondantes et l'altitude équivalente à la tranchée n'ont pas toutes dépassé ceux des crues des premières années d'analyse. D'ici découlent plusieurs explications : au fil des années, la rivière a subi une dynamique du lit, qui se traduit par une tendance générale à l'enfoncement et l'incision vers la rive gauche et une alternance des processus de dépôt et d'érosion vers la rive droite au droit de la section de la station hydrométrique. En aval, la section de la tranchée a aussi connu une dynamique assez rapide, mais la rive droite a toujours été protégée contre l'érosion, le lit s'incisant plutôt au mi-chemin entre les deux rives

Même si le site de la tranchée a été continuellement élevée et la section transversale n'a pas été tellement affectée par des incisions du lit (mais plutôt d'une alternance de submersion et émergence de la plage de sable devant la tranchée), la dynamique morphologique en amont a probablement été suffisamment forte pour avoir dicté la relation niveau – débit en aval aussi. Nous voyons clairement cet aspect sur les profils en travers des différentes années, sur lesquels nous avons représenté l'altitude équivalente des trois niveaux d'alerte administratives (côte d'attention, côte d'inondation, côte de danger), ainsi que les 11 couches du dépôt de la tranchée.

La première stratégie a réduit le nombre des crues capables, du point de vue altimétrique, d'avoir déposé les 11 couches, mais ce résultat doit être vu comme une gamme d'options tout à fait valables, que nous devons encore analyser par d'autres moyens (*Tableau X.2*). Nous avons tenu compte aussi de l'épaisseur des couches, de manière que les crues favorables devaient être aussi capables d'arriver au sommet de la couche en cause et pas seulement de dépasser de quelques cm l'altitude de la dernière. Ainsi, nous avons identifié dans le *Tableau X.2* les crues dont la participation au dépôt reste incertaine, à cause de l'altitude très proches du sommet de la couche.

**Tableau X.2.** Les crues qui correspondent au critère de l'altitude minimale pour arriver à la dernière couche déposée

	Date début	Date fin	$Q_{max}$	Cote à l'échelle (cm) pour $Q_{max}$	Alt (m)	Alt (m) tranchée
1	12/2/2014	12/17/2014	1074	404	<b>70.37</b>	<b>70.22</b>
2	10/23/2014	10/31/2014	743	332	70.01	<b>69.86</b>
3	7/27/2014	8/6/2014	855	357	70.14	<b>69.99</b>
4	5/14/2014	5/25/2014	944	376	70.23	<b>70.08</b>
5	5/3/2014	5/11/2014	859	357	70.14	<b>69.99</b>
6	4/24/2014	4/30/2014	847	355	70.13	<b>69.98</b>
7	4/17/2014	4/23/2014	895	368	<b>70.19</b>	<b>70.04</b>
8	3/3/2014	3/13/2014	809	346	70.08	<b>69.93</b>
9	3/30/2013	4/18/2013	1270	453	71.61	<b>71.39</b>
10	3/9/2013	3/21/2013	766	337	70.33	<b>70.10</b>
11	2/25/2013	3/4/2013	622	316	70.10	<b>69.87</b>
12	2/18/2010	2/26/2010	736	373	70.78	<b>70.53</b>
13	11/8/2009	11/19/2009	743	375	69.84	<b>69.58</b>
14	1/28/2009	2/5/2009	813	435	70.35	<b>70.15</b>

Nous pouvons observer que pour les 7 premières couches en bas, toutes les crues correspondent au critère. A partir de la 8<sup>e</sup> couche, le nombre de crues susceptibles d'avoir atteint un certain niveau commence à baisser, les crues concernées n'étant pas celles des années passées, mais par contre les plus récentes. En conséquence, si nous éliminons les crues des dernières années, nous ne pouvons pas les considérer débordantes ni même pour les premières années, ce qui signifie qu'elles n'ont rien déposé. De ce fait, l'âge des dépôts augmente au fur et à mesure que nous nous éloignons des derniers événements hydrologiques des années les plus riches en crues, 2013 et 2014. Ainsi, des 8 crues de l'année 2014, seulement les dernières crues de décembre (crues numéro 1 et 9) correspondent au critère. Si nous considérons aussi une certaine incertitude de l'estimation de cette altitude selon la pente, les deux crues deviendront encore moins

susceptibles d'avoir déposé. Lorsque nous descendons vers les premières années, plus de crues correspondent, même si leurs débits de pointe ne sont pas dans la plupart des cas supérieurs à  $900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Pour élucider ce problème, *une deuxième stratégie* va compléter la première de façon à restreindre davantage le nombre de crues susceptibles d'avoir déposé, en prenant en compte l'ordre chronologique et d'autres paramètres hydrologiques, comme la durée de la crue et la quantité de sédiments en suspension estimée à la station hydrométrique de Podari le jour du maximum de débit et le jour précédent.

Les résultats sont illustrés dans le **Tableau X.3**, où les crues susceptibles d'avoir déposé une certaine couche sont marquées en vert et les crues en noir sont moins susceptibles d'avoir déposé à cause de leur ancienneté. Nous sommes tentés de privilégier les crues plus longues qui ont transporté une quantité de sédiments plus grande (voir les quantités de MES de chaque crue à coté), mais nous garderons cette information pour les hypothèses à venir.

**Tableau X.3.** Caractéristiques des crues susceptibles d'avoir déposé après l'application des deux critères d'analyse

<b>Couche tranchée</b>	<b>Hauteur (cm)</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	<b>Altitude (m) au-dessous</b>	<b>Altitude (m) au-dessus</b>
Podari P11	212-235	23	70.06188	70.29188
Podari P10	206-212	6	70.00188	70.06188
Podari P9	191-206	15	69.85188	70.00188
Podari 8	168-191	23	69.62188	69.85188
Podari P7	159-168	9	69.53188	69.62188
Podari P6	141-159	18	69.35188	69.53188
Podari P5	116-141	25	69.10188	69.35188
Podari P4	99-116	17	68.93188	69.10188
Podari P3	81-99	18	68.75188	68.93188
Podari P2	61-81	20	68.55188	68.75188
Podari P1	44-61	17	68.38188	68.55188
Podari P0	0-44	44	67.94188	68.38188
Date de la tranchée : 9 juin 2017		67.941877	m	
Alt 0 échelle		66.801877	m	
Diff cote 9.06.2017 - 0 échelle		1.14	m	

Ensuite, il reste à énoncer des hypothèses sur le déroulement des processus de dépôt. Dans le Tableau X.4 nous avons marqué pour chacune des couches récentes 2-3 possibles crues. Par exemple, la couche P<sub>11</sub>, étant la plus récente, il est peu probable qu'elle ait été construite plus d'une décennie avant, donc nous avons privilégié les deux crues de 2013 et 2014. Il est tout à fait possible également que nous nous trompions et que la tranchée ne soit pas aussi récente que nous la soupçonnions.

On présente ci-après la succession des crues issue des différents scénarios (**Tableau X.4**).



**Tableau X.4.** Scénarios de crues selon le niveau à atteindre et les possibles sources

	Date début	Date fin	Cote à l'échelle (cm) pour Q <sub>max</sub>	Alt (m)	Alt (m) tranchee	R (jr.max)	R (jr.max-1)	Contribution synthèse
1	12/2/2014	12/17/2014	404	<b>70.37</b>	<b>70.22</b>	925	880	Une crue de l'aval. Ne peut pas amener du charbon. Peut-être seulement celui remise en suspension du secteur amont, mais pas distinctif. On doit chercher des traces quand même. C'était la seconde crue comme débit
4	5/14/2014	5/25/2014	376	70.23	<b>70.08</b>	990	580	Un peu de la Jiłt (peut-être un peu de lignite)< Un peu de partout du secteur montagne (on s'attend déjà la houille aussi, mais pas beaucoup)
7	4/17/2014	4/23/2014	368	<b>70.19</b>	<b>70.04</b>	925	555	Tous les trois secteurs, surtout les petits affluents de N1 et N2. Un peu moins la Jiu de l'Ouest— Le charbon est plutôt de type houille inférieure
9	3/30/2013	4/18/2013	453	71.61	<b>71.39</b>	1417	1240	Une crue du N2 et du N3. De la houille peut-être on peut trouver, mais pas beaucoup. —C'était la plus forte crue. On doit chercher quelque chose distinctif parce qu'elle doit eu avoir toutes les chances de déborder et déposer les sédiments
10	3/9/2013	3/21/2013	337	70.33	<b>70.10</b>	1034	590	Une crue de partout. On s'attend à plus d'houille et à un peu moins de lignite
11	2/25/2013	3/4/2013	316	70.10	<b>69.87</b>	390	275	Une crue de l'aval. Ne peut pas amener du charbon. Peut-être seulement celui remise en suspension du secteur amont, mais pas distinctif—Le bassin de la Tismana et plus contributif. Une crue pas très forte avec peu de chances d'avoir fait le dépôt
12	2/18/2010	2/26/2010	373	70.78	<b>70.53</b>	765	605	La Motru participe, la Jiłt aussi et on voit un peu de contribution de la Jiu de montagne aussi. On peut s'attendre à une quantité presque égale de lignite et houille. —Quand même, une crue pas très forte

13	11/8/2009	11/19/2009	375	69.84	<b>69.58</b>	530	461	Jiu de l'Ouest (de la houille supérieure), Motru et Tismana (sans charbon).
14	1/28/2009	2/5/2009	435	70.35	<b>70.15</b>	950	646	Motru et les rivières de N2. Pas de charbon
15	12/18/2008	12/26/2008	402			820	655	Une crue des secteurs aval des N2 et N#, mais aussi un peu de Motru. Il doit avoir une signature de partout. Mais de toute façon la crue n'a pas été très forte. On croit pas qu'elle a contribué au dépôt
16	11/16/2007	11/26/2007	485	71.76	<b>71.64</b>	675	575	Une crue du N2 surtout. On peut trouver des traces de lignite de la Jiłt et moins de la houille.— On peut la garder pour l'analyse finale quand même, car le débit a été élevé.
17	10/23/2007	11/1/2007	440	71.31	<b>71.19</b>	620	599	Une crue de l'amont, aussi que du bassin de la Tismana, de l'Amaradia et de la Gilort. Pas très bien distinguée. Une faible importance parmi les crues de toute façon
18	3/23/2007	4/2/2007	403	70.67	<b>70.55</b>	575	590	Les secteurs aval des bassins versants (B.I.2 et B.I.3), un peu de partout. Dans chaque niveau il y a au moins une rivière qui contribue. Mais de toute façon la crue a été très faible.
19	4/11/2006	4/19/2006	445	70.86	<b>70.65</b>	630	807	Jiu de l'ouest et toute la partie occidentale du N2, sauf la Jiłt. Donc on est à la recherche de la houille seulement

## ***10.2. La caractéristique des sédiments déposés à l'aval correspond-elle aux caractéristiques signalées en amont?***

Pour estimer le transfert des sédiments, il est essentiel de déterminer le type de sources de sédiments [Sang *et al.*, 2018], qui peut être fait possible par la mise en œuvre de toute une panoplie de techniques telles que: la géochimie, l'analyse des radionucléides et des carottes de sédiment, la prise d'empreintes digitales sur les sédiments, la télédétection, etc. [Navratil *et al.*, 2012; Haddachi *et al.*, 2013; Legout *et al.*, 2013; Némery *et al.*, 2013; Sang *et al.*, 2018]. L'export des sédiments est très variable dans le temps, mais elle diffère principalement en termes de composition géochimique, en raison de la lithologie et des impacts des activités humaines sur leur formation [Piqué Altés, 2017].

La présente recherche vise à étudier la contribution des zones d'extraction de charbon à l'apport de sédiments fins dans les cours d'eau, en adaptant les méthodes d'analyse colorimétrique et d'analyse d'images et géochimiques.

Compte tenu des différentes méthodes utilisées (présentées aux chapitres §7 et §8), il est difficile de corréliser les résultats fournis par chacune d'elles en même temps. Nous avons plutôt décidé de séparer les approches en fonction de leur degré de généralisation. Le sens de mise en correspondance des résultats entre l'historique des crues et des dépôts va de général au particulier. Ainsi, d'abord nous allons présenter les résultats des méthodes qui n'étaient conçues que pour attribuer de manière globale les différentes sources de sédiments (colorimétrie et teneur en particules de charbon sur la base de l'analyse d'images). Ensuite, nous allons détailler l'analyse pétrologique (qui permet également de discriminer entre les zones d'extraction et de préparation du charbon en fonction des propriétés pétrographiques), et nous allons passer enfin aux analyses géochimiques les plus précises (teneur en charbon et spéciation, ainsi que teneur en métaux lourds et lanthanides), capables de distinguer plus en détail (et à des échelles spatiales plus fines) une source d'une autre, suivant le contexte géologique et géochimique des sous-bassins d'où les échantillons ont été prélevés.

### **10.2.1. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval et échantillonnés en amont en utilisant la colorimétrie**

L'analyse spectrocolorimétrique a été une première étape dans la caractérisation des propriétés physiques des échantillons prélevés. Le but de cette analyse a été de trouver, si possible, des zones sources de sédiments avec des caractéristiques colorimétriques facilement à distinguer. L'approche méthodologique a reposé sur la légère différence de couleur entre le charbon bitumineux et le lignite, ce qui fait des particules de charbon un traceur facile à utiliser.

#### ***10.2.1.1. Les caractéristiques des spectres colorimétriques des échantillons prélevés dans les zones sources de sédiments***

Les propriétés spectrocolorimétriques des sédiments ont servi à les classer afin d'identifier les sources possibles. Comme expliqué au §8.2.2, dans cette analyse colorimétrique, deux types d'échantillons ont été utilisés :

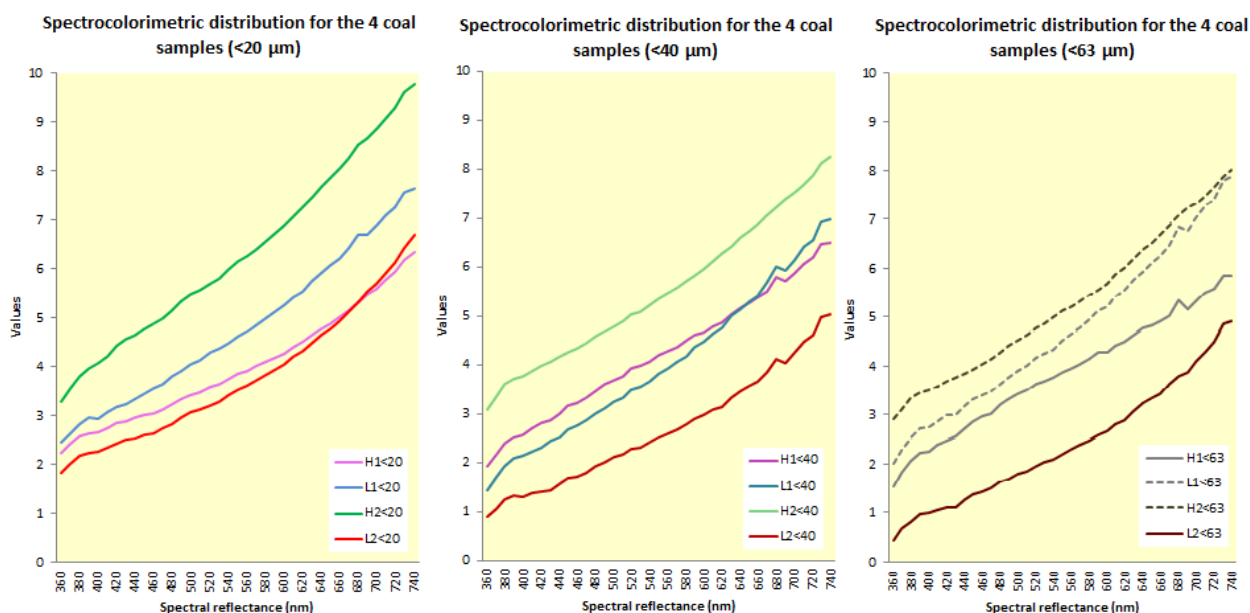
- Les échantillons de l'amont, considérés comme provenant des zones sources. À leur tour, ils sont subdivisés en 2 catégories : 77 sédiments des lits de rivières (de la Jiu et ses affluents), ainsi que 6 échantillons de charbon brut, lignite et houille, prélevés sur plusieurs sites considérés comme sources potentielles pour les particules de charbon identifiées dans les sédiments en aval (le tas de stéril des champs miniers, les pentes externes des carrières, le lit majeur du réseau hydrographique le long des aires d'extraction de la houille etc).

- Les échantillons de l'aval, représentés uniquement par les sédiments déposés sur la rive d'accumulation en aval de la station hydrométrique de Podari (11 des couches sédimentaires + 1 échantillon de la couche de base de la tranchée T<sub>aval</sub>).

Nous rappelons que l'analyse spectrocolorimétrique se circonscrit au but central de la partie expérimentale de la thèse, à savoir de déterminer les sources possibles des strates sédimentaires déposées

en aval de la station hydrométrique de Podari, sur la rive droite de la rivière Jiu. Dans le chapitre §9.1, suivant l'approche de confirmation de la succession stratigraphique, nous avons appliqué le test non paramétrique de Kolmogorov-Smirnov afin de comparer les distributions spectrales des 11 couches. Étant donné que les sédiments qui composent les couches sont constitués d'un mélange de matériaux de différentes sources, ils se ressemblent beaucoup, mais statistiquement, le teste a été capable de confirmer l'existence des différences entre la distribution des valeurs pour certains intervalles de longueur d'onde. Les résultats de l'application de ce test en comparant deux par deux les échantillons des 11 couches ont renforcé l'hypothèse selon laquelle ils sont différents et que, par conséquent, leur dépôt devrait être dû, au moins partiellement, à l'action de sources différentes en amont. Dans ce sous-chapitre, nous ferons appel aux échantillons de l'amont aussi, afin d'expliquer certaines des sources de sédiments déposées en aval.

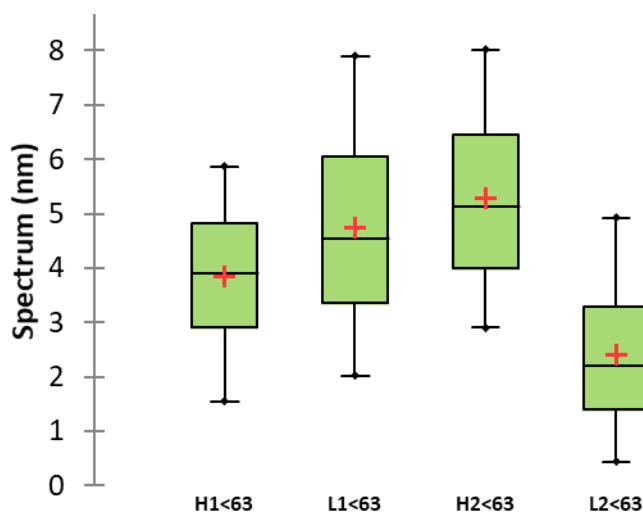
L'analyse colorimétrique a commencé par la détermination des caractéristiques des échantillons de charbon. Le but de cette démarche a été de vérifier s'il existe un spectre différent pour les échantillons de lignite et de houille. Pour cela, les distributions spectrales des échantillons ont été comparées à travers des représentations visuelles, réalisées à l'aide de plusieurs fractions granulométriques des échantillons de charbon. Notre hypothèse est que plus les particules étaient petites, plus la surface mesurée avec le faisceau de lumière envoyée par le colorimètre était plus homogène et la couleur plus représentative. Ainsi, nous présentons une méthodologie de sélection des particules  $\leq 63$  microns sur la base de la distribution spectrale colorimétrique des échantillons de charbon brut. Pour la comparaison des distributions spectrales, nous avons utilisé les fractions de 63, 40 et 20 microns de quatre échantillons de charbon (deux de lignite et de deux houille) provenant de différentes zones des deux bassins carbonifères (*Figure X.4*).



**Figure X.4.** Le spectre colorimétrique des échantillons de charbon

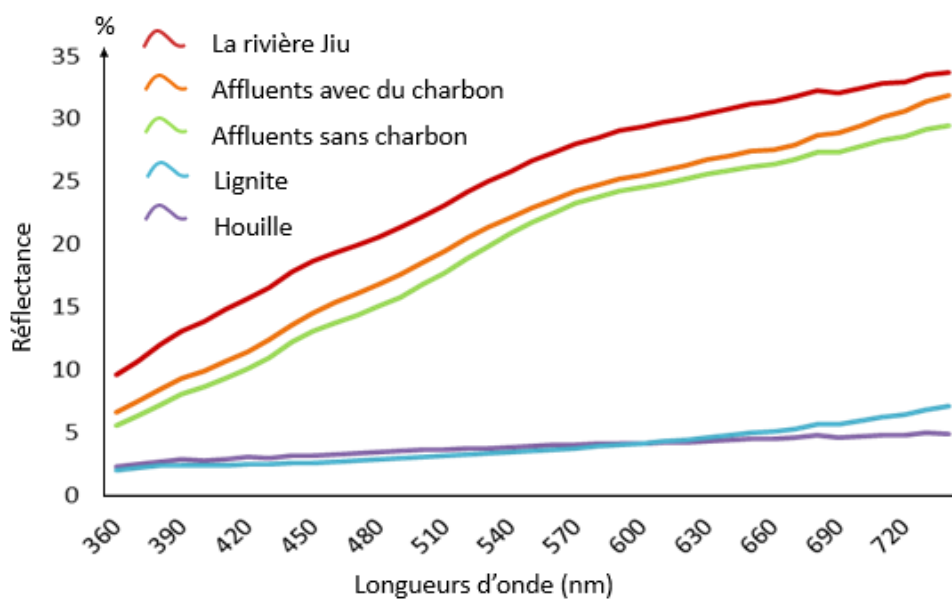
Nous observons que la fraction la plus grossière de charbon (63 microns) n'est pas capable d'aider à la distinction entre les échantillons de lignite et de houille, d'autant moins entre les échantillons de la même espèce provenant de différents endroits. Plus on diminue la taille des particules, plus les deux espèces présentent des spectres différents, avec la houille ayant des valeurs plus petites (on confirme avec ce résultat la nuance de gris – noir plus sombre de la houille) que le lignite. Pour exemplifier la différence entre les deux espèces, nous pouvons regarder l'échantillon de lignite L2 d'une énergie beaucoup plus basse

(probablement un noir plus intense) et l'échantillon de la houille H2 d'une réflectivité plus grande avec des valeurs pour toutes les gammes de longueurs d'onde supérieures à 3% (l'échantillon Houille 2 été prélevé dans le bassin de la Jiu de l'Ouest, où le charbon a un rang supérieur). On constate que plus le rang de charbon est élevé, plus le noir est sombre et moins intense et plus proche du noir métallique, ce qui permet de refléter la lumière et d'induire l'effet apparent que l'échantillon est plus coloré. Nous observons ces deux exemples également à la **Figure X.5**, dans laquelle les mêmes distributions apparaissent sous la forme de boîtes à moustaches, avec des médianes visiblement différentes.



**Figure X.5.** Boîtes à moustaches de la distribution spectrocolorimétrique des quatre échantillons de charbon

Si nous allons plus loin pour comparer les spectres des échantillons de sédiments avec ceux de charbon brut (**Figure X.6**), il est possible d'observer une différence nette entre les échantillons non homogène et plus pale de sédiment d'origines mélangées (avec des valeurs allant d'environ 5% pour l'intervalle de 360 à 370 nm jusqu'à 35% pour la plage de 730 à 740 nm), par rapport à la distribution spectrocolorimétrique d'un échantillon de charbon compact (entre à peine plus de 1% et <10%).

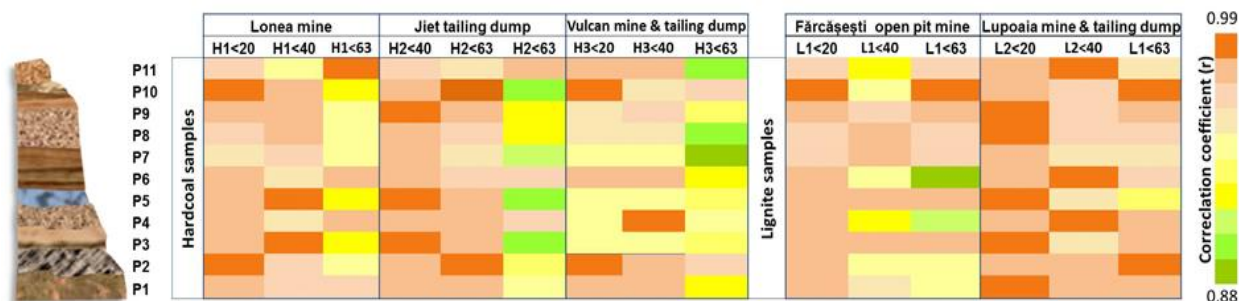


**Figure X.6.** Comparaison entre le spectre colorimétrique des échantillons de charbon et de sédiments mélangés

Cette différence est due au fait qu'un échantillon de charbon absorbe la plupart de la lumière et ne laisse qu'une très petite quantité être renvoyée vers le colorimètre. Dans cette phase de l'analyse, nous ne



pouvons tirer aucune autre conclusion pertinente sur la plage spectro-colorimétrique caractéristique d'une espèce de charbon et encore moins sur celle attendue dans un échantillon de sédiment mixte avec une proportion sûre ou probable de graines de charbon. Tout ce que cette phase de l'analyse nous permet de supposer est que la présence d'une certaine quantité de charbon dans les sédiments peut influencer la réponse spectro-colorimétrique par le rapprochement de la nuance de brun vers le noir, ce qui aura également des conséquences pour les indicateurs colorimétriques.



La magnitude du coefficient de corrélation entre les différents indices colorimétriques obtenus pour des échantillons de sources de charbon (H1, H2, H3, L1, L2) et des échantillons de sédiments déposés sur la rive du fleuve Podari (P1 ... P11). Notez que: a) P1 est la couche la plus ancienne, celle située au bas de la tranchée et P11, la couche la plus récemment déposée; b) Les trois fractions <63  $\mu\text{m}$ , <40  $\mu\text{m}$  et <20  $\mu\text{m}$  ont été utilisées pour chacun des 5 échantillons de charbon, identifiables par le nom de la zone d'exploitation où elles ont été prélevées (pris de [Moroşanu et al., 2019](#))

#### 10.2.1.2. Mise en place des modèles de classification des échantillons

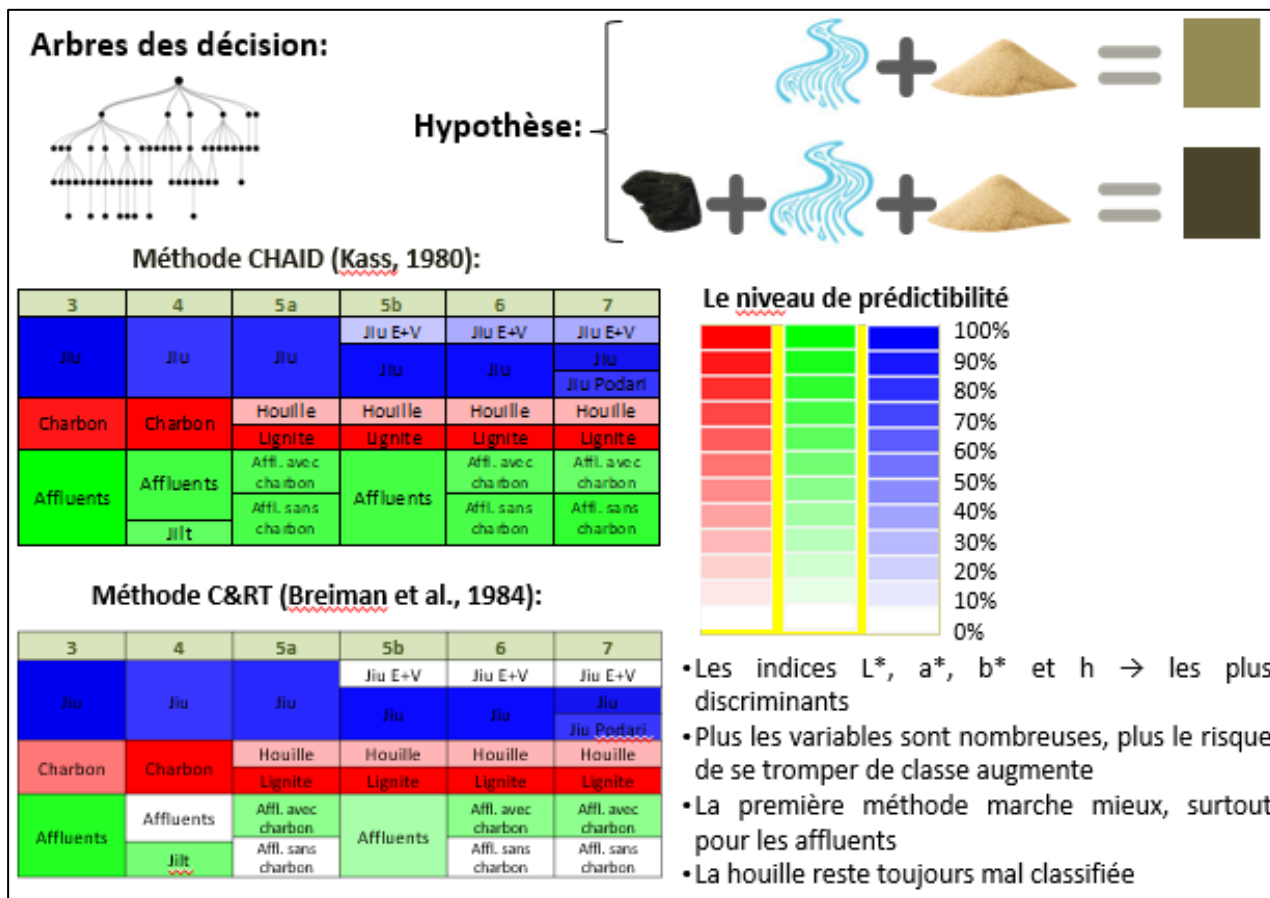
Une brève analyse colorimétrique met en évidence la distribution en longueur d'onde de la mesure de la couleur des sédiments, qui a été ensuite intégrée dans les formules de calcul pour obtenir une colorimétrie synthétique ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  etc). Pour plus de détails sur la façon de mesurer le spectre colorimétrique et le calcul des différents indicateurs (17 au total), le lecteur doit se reporter au §8.3.3.

Les principaux outils que nous avons employés ont été les arbres de classification, l'une des techniques les plus efficaces et les plus largement utilisées dans l'exploration de données, qui permettent d'attribuer des observations ou des objets à des classes d'une variable dépendante en utilisant les mesures sur une ou plusieurs variables prédictives. Les arbres de décision sont construits sur des algorithmes conçus pour prédire ou expliquer les réponses d'une variable dépendante à partir d'un ensemble de variables prédictives, en utilisant les principes liés aux méthodes traditionnelles d'analyse discriminante, de tests non paramétriques et d'estimation non linéaire.

Dans notre cas, les indices colorimétriques des échantillons de charbon et de sédiments en amont ont été les variables prédictives et les échantillons de sédiments du dépôt alluvial en aval de la station hydrométrique de Podari ont été les variables dépendantes. La flexibilité et la complexité font des arbres interactifs une option souvent choisie par rapport aux autres, à notre avis, mais cela ne signifie pas qu'ils doivent complètement remplacer les méthodes traditionnelles (analyse factorielle ACP, tests non paramétriques et régression linéaire). En fait, lorsque les hypothèses des fonctions discriminantes traditionnelles peuvent expliquer partiellement la variation des variables prédictives dans la formation des variables dépendantes, dans le cas de nos données (les spectres et indices colorimétriques des échantillons des zones sources et de l'aval) il n'existe pas de lien évident (une fonction de dépendance) entre les sources et les sédiments accumulés dans le bassin de la rivière Jiu.

Bien que certaines ressemblances puissent être remarquées pour une partie des couches alluviales et les échantillons des zones sources, en utilisant une partie des indices colorimétriques, les approches traditionnelles (par la corrélation linéaire ou l'analyse en composantes principales), n'ont pas prouvé suffisantes.

Ce problème de choix et efficacité de méthode dans notre analyse colorimétrique est lié en grande partie à la qualité et au type de variables utilisées: a) tout d'abord, le bassin de la rivière Jiu est très complexe et avec moins de 100 échantillons, il n'est pas possible de prendre en compte toutes les sources possibles de sédiments, et encore moins de comparer tout leur spectre colorimétrique; b) à quelques exceptions introduites par les minéraux plus colorés mais non abondants, tous les autres ne se distinguent pas par leur couleur (en général brunâtre), quelle que soit leur origine sédimentaire, métamorphique ou bazaltique; c) la fraction de charbon des sédiments, comme nous avons pu voir au §10.2.1 est difficilement à distinguer simplement en regardant leurs nuances, car le lignite et la houille ont des nuances de très proches; d) dans tous les cas, même si nous essayons simplement de tenir compte de la teneur générale en charbon dans les sédiments, l'effet de couleur d'une quantité ou d'une autre correspond simplement à la noirceur ou à la luminosité de l'échantillon mélangé, pas à une couleur spécifique. Il est donc encore plus difficile dans notre cas de trouver l'outil statistique approprié pour prendre en compte l'effet colorimétrique d'une quantité de charbon donnée dans une masse de sédiment de teintes brunes, car les indices colorimétriques capturent surtout les différences en couleur. Dans le cas idéal d'une distribution colorimétrique qui permettrait presque toute analyse de régression et d'analyse discriminante, le mélange entre les sédiments source et le charbon devrait clairement donner ce que la *Figure X.7* nous suggère.



**Figure X.7.** Le modèle idéal de mélange charbon-sédiments basé sur la colorimétrie

Au lieu de cela, les choses ne sont pas si faciles et nous trouvons en revanche des particules de charbon (dans une proportion inconnue) parmi la couleur des autres sédiments.

Par conséquent, en ce qui concerne le charbon en tant que traceur colorimétrique, il est un vrai défi de distinguer un échantillon de sédiment clair (composé uniquement des particules inorganiques) d'un échantillon contenant une certaine proportion de charbon. Pour explorer ces différences et parvenir à donner quelques pistes sur les sources possibles de ces sédiments mixtes, les hypothèses et les jeux de données disponibles ne sont pas assez puissants pour être utilisés dans une analyse discriminante, par contre un arbre de classification interactif serait plus approprié, voire un peu plus adapté.

En dernier ressort, le groupe de méthodes explorant la prédiction et la dépendance entre les variables par la construction d'arbres de classification est plus prête à créer un système des classes à partir des valeurs des indices colorimétriques. Ces indices ont été utilisés comme mesures pour estimer les différences et les ressemblances entre les échantillons en amont et en aval. Afin de comparer et de valider les résultats, deux méthodes basées sur les arbres de classification ont été appliquées : CHAID (*Chi-square automatic interaction detection*) et C&RT (*Classification and regression tree*).

La détection d'interaction automatique du chi carré (**CHAID**) est une technique d'arbre de décision basée sur un test de signification ajusté (test de Bonferroni). La technique a été mise au point en Afrique du Sud [Kass, 1980] pour une prédiction similaire à celle de l'analyse de régression, de la classification et pour la détection des interactions entre variables.

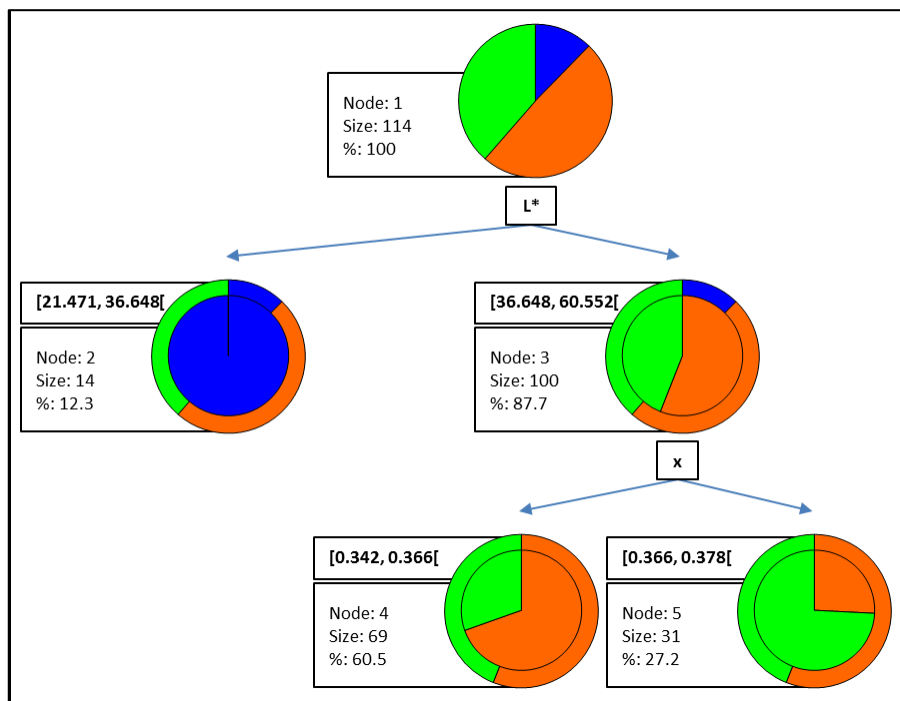
L'une des raisons pour choisir l'arbre de décision CHAID réside dans sa manière très visuelle de produire les résultats et de la facilité d'interprétation. Il peut également fonctionner avec un nombre réduit d'échantillons, car il utilise des fractionnements à plusieurs entrées. Ceci constitue un vrai avantage, car notre nombre d'échantillons est justement modeste.

De l'autre côté, **C&RT** est une technique de classification des variables par l'intermédiaire des arbres de décision, proposée par Breiman et Cie (1984). La technique est assez similaire avec la première dans la plupart des fonctions, mais quelques éléments importants la rendent distincte. La nature hiérarchique d'un arbre de classification C&RT est identique à la procédure de décision suivie par une analyse traditionnelle discriminante, comme nous venons de le mentionner. Une analogie entre les deux approches (arbres de classification vs analyse discriminante), utilisant des ensembles de données médicales, est donnée dans l'exemplification de la méthode C&RT de Breiman *et al.* (1984), évoquant la possibilité d'étudier les effets des variables prédictives une par une, plutôt que toutes en même temps. La principale différence par rapport à la méthode de classification précédente est donc peut-être la possibilité d'examiner un à un les effets des prédicteurs sur les implications pour les variables dépendantes à l'aide de ses deux fonctions d'analyse, Quest et Cart.

Les deux techniques de classification ont été appliquées successivement pour un nombre croissant de classes. Pour chaque application, les échantillons ont été divisés en classes sur le jugement expert. Dans les deux modèles de classification, tous les 17 indices colorimétriques calculés pour les spectres d'échantillons de sédiments et de charbon ont été utilisés comme variables. Les deux méthodes de classification ont ainsi servi à vérifier le nombre de ces échantillons qui avaient été reconnus comme appartenant à ces classes. De cette manière, le pouvoir prédictif du modèle et l'attribution de l'un ou l'autre

des échantillons à une classe correcte sont vérifiés. L'approche suit la logique du simple au complexe, en partant du nombre minimal de classes au nombre maximal au-delà duquel il était possible de constater qu'aucun changement en faveur de la reconnaissance d'une classe ou d'une autre ne pouvait être obtenu.

Dans le premier essai, trois classes ont été utilisées : 1) les sédiments de la rivière Jiu (tout compris - échantillons de lit et de dépôt de berge) ; 2) les sédiments des affluents et 3) les échantillons de charbon (lignite et houille indistincts). Les arbres de décision résultent se trouvent dans la **Figure X.8**.



**Figure X.8.** Arbres de décision de la classification à 3 catégories : Jiu, affluents et charbon

Les deux modèles ont donné de très bons résultats, notamment la méthode CHAID, avec une prédictibilité de 95%. La catégorie du charbon a été identifiée dans 100% des cas, les sédiments de la Jiu dans une proportion de 85 à 90%, avec un meilleur rendement par la méthode CHAID, tandis que les sédiments des affluents ont présenté des variations très importantes, allant de 100% avec CHAID, à seulement 50,2% selon la méthode C&RT (**Tableau X.5**).

**Tableau X.5.** Matrice de confusion de l'application des deux modèles de classification à 3 catégories (sédiments de la Jiu, sédiments des affluents et échantillons de charbon)

**CHAID**

from \ to	Charbon	Bassin Jilt	Jiu	Affluents	Total	% correct
Charbon	14	0	0	0	14	100.00%
Bassin Jilt	0	8	4	1	13	61.54%
Jiu	0	0	54	3	57	94.74%
Affluents	0	2	5	23	30	76.67%
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>63</b>	<b>27</b>	<b>114</b>	<b>86.84%</b>

**C&RT**

from \ to	Charbon	Bassin Jilt	Jiu	Affluents	Total	% correct
Charbon	14	0	0	0	14	100.00%
Bassin Jilt	0	7	6	0	13	53.85%
Jiu	0	3	54	0	57	94.74%
Affluents	0	7	23	0	30	0.00%
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>83</b>	<b>0</b>	<b>114</b>	<b>65.79%</b>

En ce qui concerne l'efficacité des indicateurs colorimétriques dans la classification des échantillons de charbon et de sédiments, le premier nœud d'arbre de décision est construit selon l'indice "L\*" et le second avec l'indice "x".

Pour la seconde classification (4 catégories), l'objectif a été de voir si les sédiments du bassin de la rivière Jilț, affluent de gauche de la Jiu, qui draine la plus grande partie du bassin de lignite de Motru - Rovinari, sont reconnus comme ayant une couleur différente des sédiments d'autres affluents. Pratiquement, la catégorie des sédiments des affluents a été divisée en deux, c'est à dire des sédiments de la rivière Jilț et des sédiments des autres rivières qui ne sont pas directement liées aux activités minières. De plus, vu à l'œil nu, les sédiments du bassin de la rivière Jilț sont en général jaunâtres – verdâtres de texture lutteuse, la couleur étant due, comme nous le verrons dans un futur sous-chapitre (§10.5.), à la teneur plus élevée en titane, fer et zirconium.

À la suite de cette classification, le rendement a été inférieur par rapport à la première, la prédictibilité des 4 classes d'échantillons tombant à 87% (pour la méthode CHAID) et à 66% (pour la méthode C&RT). Les échantillons de charbon ont été à nouveau correctement classés à 100% par les deux méthodes, mais les différences sont apparues dans les échantillons de sédiments. Étonnamment, une fois la quatrième classe de sédiments sur la rivière Jilț incluse dans l'analyse, les deux méthodes ont donné le même rendement sur les sédiments de la rivière Jiu (95%), comme dans le cas de la classification correspondante à 3 catégories, à la méthode CHAID (**Tableau X.6**).

**Tableau X.6.** Les résultats de la classification avec 4 catégories (les sédiments de la rivière Jiu, le charbon, les sédiments de la rivière Jilț et des échantillons des autres affluents)

Méthode CHAID							Méthode C&RT						
from \ to	Charbon	Bazinul Jilt	Jiu	Afluenți	Total	% corect	from \ to	Charbon	Bassin Jilt	Jiu	Affluents	Total	% correct
Charbon	14	0	0	0	14	100.00%	Charbon	14	0	0	0	14	100.00%
Bassin Jilt	0	8	4	1	13	61.54%	Bassin Jilt	0	7	6	0	13	53.85%
Jiu	0	0	54	3	57	94.74%	Jiu	0	3	54	0	57	94.74%
Affluents	0	2	5	23	30	76.67%	Affluents	0	7	23	0	30	0.00%
<b>Total</b>	14	10	63	27	114	86.84%	<b>Total</b>	14	17	83	0	114	65.79%

En effet, dans la classification précédente, la méthode C&RT avait accumulé des erreurs en plus de celles de la méthode CHAID car certains sédiments des affluents étaient supposés provenir de la Jiu, probablement en raison de la couleur plus claire. La catégorie distincte de la rivière Jilț ayant été introduite, tous ces sédiments confondus ont été attribués à la Jilț, pas à la rivière Jiu.

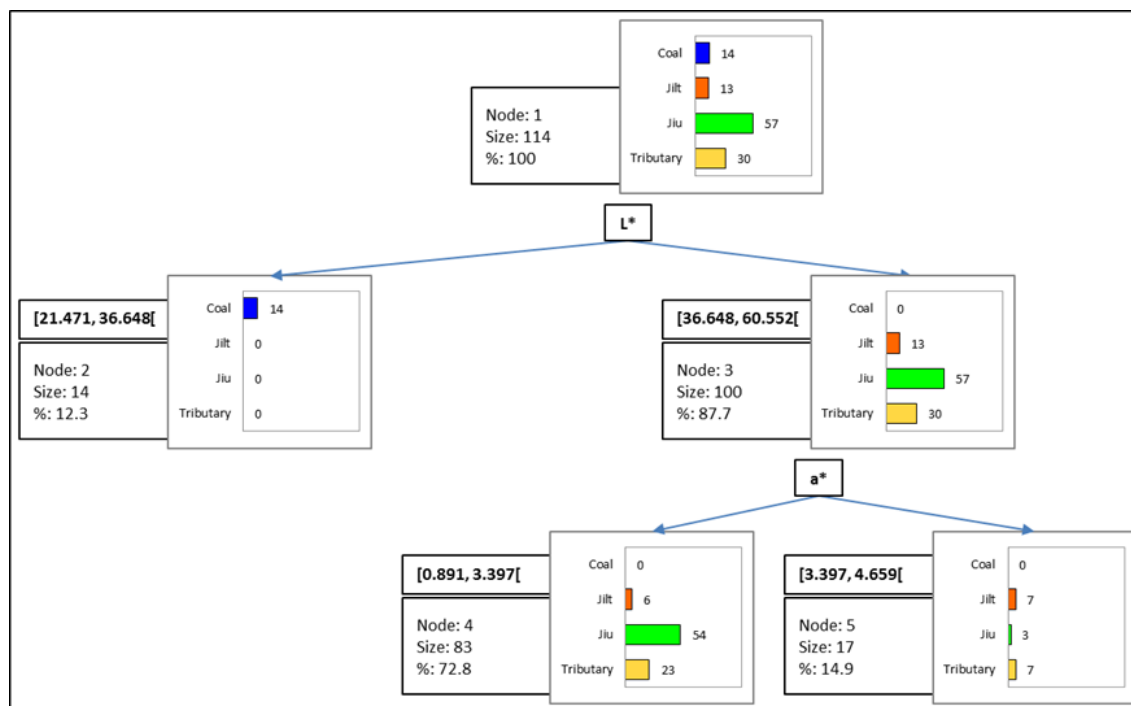
Les deux modèles ont réussi à classer correctement 82% (CHAID) et 64% (C&RT) respectivement. Bien que les sédiments de la rivière Jiu restent aussi bien classés, les échantillons de charbon ne l'étaient pas aussi bien (~95% selon les deux méthodes), comme l'indique le **Tableau X.7**.

**Tableau X.7.** Les résultats de la première classification avec 5 catégories : les sédiments de la rivière Jiu, le lignite; la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents

Provenance variable	Catégorie	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)
	Charbon	14	12.281
	Bassin Jilț	13	11.404
	Jiu	57	50.000
	Affluents	30	26.316

Les indicateurs qui ont joué le plus grand rôle dans la classification des échantillons de charbon et de sédiments étaient "L\*" pour le premier nœud, respectivement "a\*" pour le deuxième nœud de la branche d'arbre de décision (**Figure X.9**).





**Figure X.9.** Arbres de décision de la classification à 4 catégories (les sédiments de la Jiu, les sédiments de la rivière Jilt, les sédiments des autres affluents et le charbon)

Ensuite, en vue de la classification avec 5 catégories, deux hypothèses ont été testées, aboutissant à deux modèles de décision. La première classification à 5 catégories a utilisé les classes suivantes : 1) sédiments de la Jiu, 2) sédiments des affluents des zones charbonnières, 3) sédiments des affluents sans charbon, 4) échantillons de lignite, et 5) échantillons de houille.

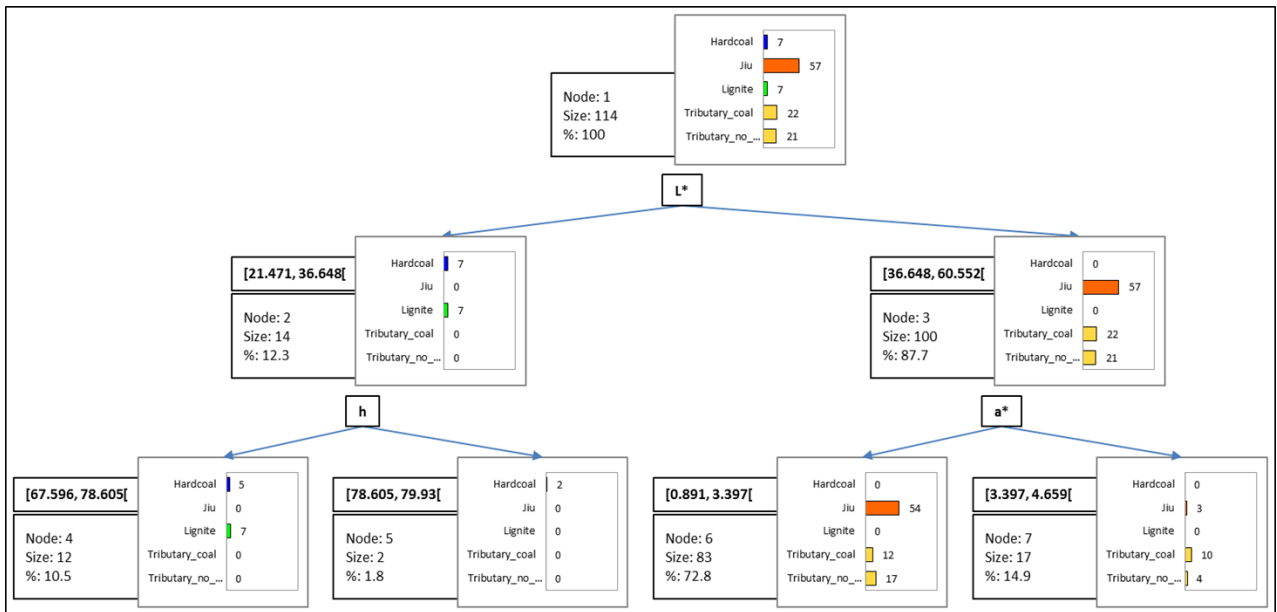
Le lignite a été reconnu par les deux méthodes, tandis que des pourcentages inférieurs à 30% ont été obtenus pour les sédiments de houille, dont la plupart ont été classés comme lignite. Seuls les échantillons de houille de la rivière Jieț ont été correctement reconnus. Un résultat intéressant concerne les échantillons de sédiments de rivières qui ne traversent pas de zones carbonifères, ils traversent donc des zones claires. Alors que la méthode CHAID était capable de les classer correctement (71%), la méthode C&RT ne parvenait pas à l'adapter à la bonne catégorie, probablement en prenant en compte des échantillons de sédiments mélangés.

La seconde classification avec 5 catégories concerne les types d'échantillons suivants : 1) la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani) ; 2) les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est ; 3) les sédiments de tous les affluents ; 4) les échantillons de lignite ; 5) les échantillons de houille. Par rapport à la classification précédente des 5 catégories, celle-ci a eu plus de succès, avec environ 77% de justesse dans le modèle CHAID et 61% dans le modèle C&RT (**Tableau X.8**).

**Tableau X.8.** Les résultats de la deuxième classification avec 5 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, les sédiments de tous les affluents, le lignite, la houille

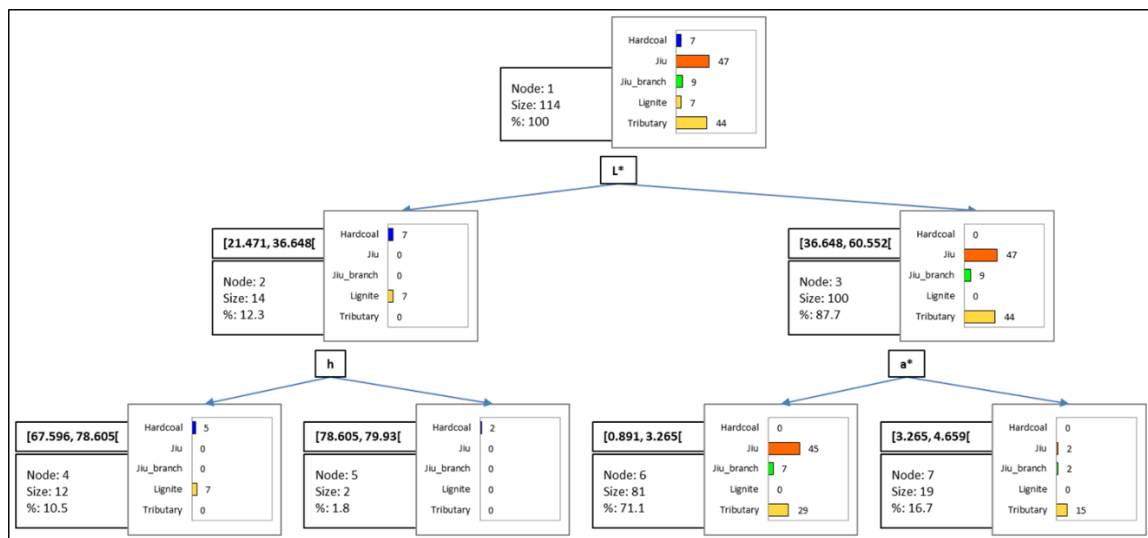
Provenance variable	Catégorie	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)
	Houille	7	6.140
Jiu	57	50.000	
Lignite	7	6.140	
Affluents charbon	22	19.298	
Affluents sans charbon	21	18.421	

Les indicateurs colorimétriques constituant les deux premiers niveaux de nœuds des arbres de classification ont été "L\*", "h" et "a\*" (*Figure X.10*).



**Figure X.10.** Arbres de décision de la première classification à 5 catégories : les sédiments de la rivière Jiu, le lignite, la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents

Les pourcentages les plus faibles ont été obtenus à partir d'échantillons de sédiments prélevés sur les deux branches de la Jiu dans le secteur supérieur (respectivement 22% et 0%), ce qui a été interprété par le fait que ces sédiments, bien que la Jiu de l'Ouest et de l'Est soient directement liées au bassin de Petroșani pour l'exploitation de la houille, n'ont pas de couleurs nécessairement différentes de celles de la Jiu en aval. Cette fois aussi, les indicateurs colorimétriques "L\*", "h" et "a\*" ont conduit à la formation des nœuds des principales ramifications des arbres de décision (*Figure X.11*).



**Figure X.11.** Arbres de décision de la deuxième classification à 5 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, les sédiments de tous les affluents, le lignite, la houille

L'avant-dernière classification a concerné 6 catégories : 1) les sédiments de la rivière Jiu (alluvions de la tranchée à Podari + sédiments du lit de la rivière Jiu en aval des gorges à la sortie du secteur montagne) ; 2) les sédiments des affluents sans charbon ; 3) les sédiments des affluents traversant des zones

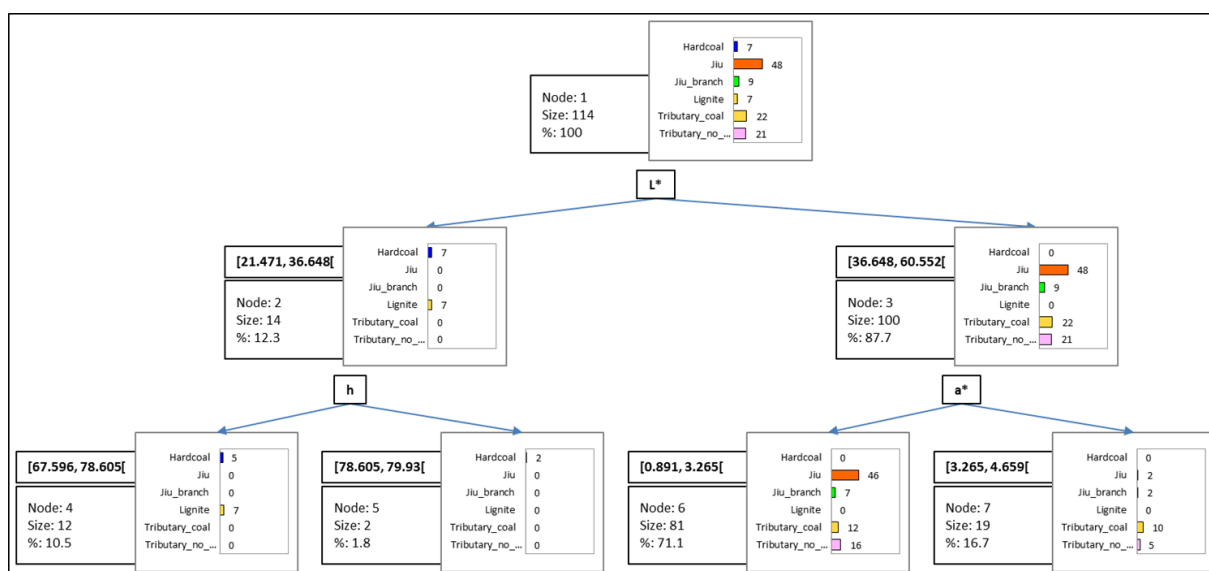
avec des exploitation de charbon ; 4) les échantillons de lignite ; 5) les échantillons de houille et 6) les sédiments de la Jiu de l'Est et de la Jiu de l'Ouest. Fondamentalement, cette classification emprunte des éléments des deux autres précédentes concernant la division des échantillons de la rivière Jiu par secteurs (amont et aval des montagnes) et des affluents sur des zones carbonifères et des zones en dehors des exploitations charbonnières.

Nous notons que plus nous incluons un nombre élevé de catégories dans la classification, plus le rendement est faible (il est de 76% avec la méthode CHAID et de 57% avec la méthode C&RT). En fait, la seule amélioration des résultats concerne l'un des échantillons de la Jiu de l'Ouest qui a été correctement classé à présent, bien qu'il fût auparavant considéré comme un échantillon d'un affluent. Le **Tableau X.9** montre les matrices de confusion obtenues en appliquant les deux modèles de classification à 6 catégories.

**Tableau X.9.** Les résultats de la classification avec 6 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, le lignite, la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents

Provenance variable	Catégorie	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)
	Houille	7	6.140
	Jiu aval les gorges	48	42.105
	Jiu (de l'Ouest + de l'Est)	9	7.895
	Lignite	7	6.140
	Affluents avec charbon	22	19.298
	Affluents sans charbon	21	18.421

Comme pour les autres classifications, les indices colorimétriques ayant contribué à la ramification de l'arbre de décision étaient les mêmes, "L\*", "h" et "a\*" (**Figure X.12**).



**Figure X.12.** Arbres de décision de la classification à 6 catégories : la rivière Jiu (la tranchée à Podari + les sédiments de la rivière Jiu en aval de la dépression de Petroșani), les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est, le lignite, la houille, les sédiments de la rivière drainant des bassins carbonifères et les échantillons des autres affluents.

Enfin, les résultats les plus récents de la classification précédente ont été pris en compte dans les catégories de la dernière classification. Les 7 catégories de cette dernière classification étaient les suivantes: 1) sédiments sur la rivière Jiu dans le secteur extra montagneux (en aval des gorges) ; 2) les sédiments de la rivière Jiłț ; 3) les échantillons de sédiments des affluents drainant des zones charbonnières (autres que

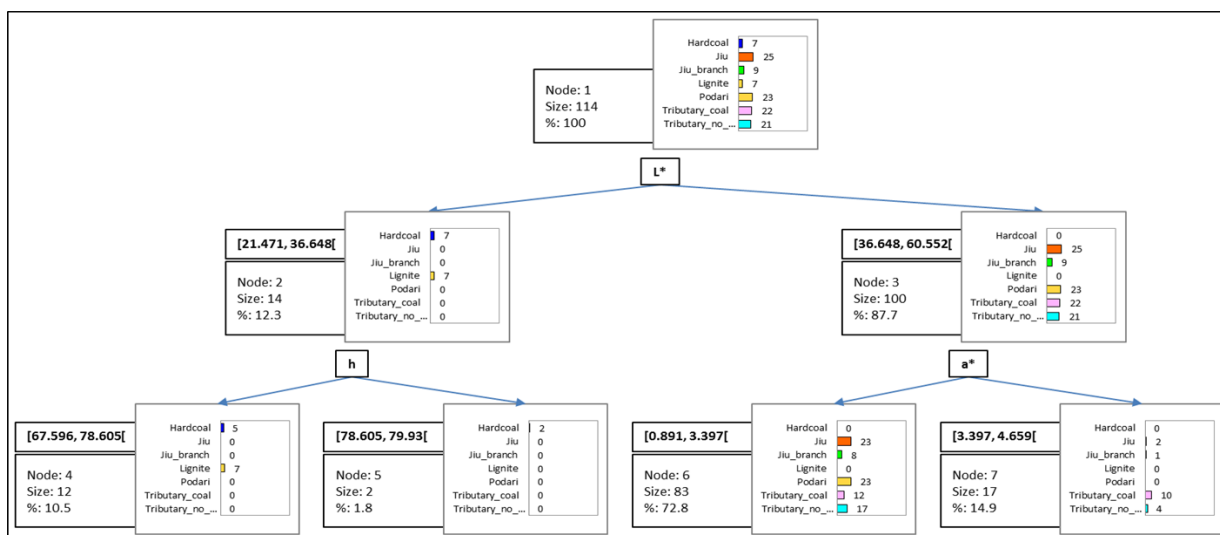
ceux du bassin de la rivière Jilț) ; 4) les sédiments des autres affluents ; 5) les échantillons de charbon (en raison du pourcentage de la houille qui ne s'est pas amélioré, nous n'avons pas insisté sur les deux espèces et nous nous sommes conformés à une classification générale du charbon) ; 6) les sédiments dans la tranchée de Podari et 7) les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est. Si, par la méthode CHAID, la matrice de confusion a donné le même rendement que dans la classification précédente (74,5%), la méthode C&RT prédit seulement 36,8% des catégories (*Tableau X.10*).

**Tableau X.10.** Les résultats de la classification avec 7 catégories : les sédiments sur la rivière Jiu dans le secteur extramontain (en aval des gorges), les sédiments de la rivière Jilț, affluents drainant des zones charbonnières (autres que ceux du bassin de la rivière Jilț), les sédiments des autres affluents sans charbon, les sédiments de la tranchée de Podari, les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est

Provenance variable	Catégorie	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)
	Houille	7	6.140
Jiu aval les gorges	25	21.930	
Jiu (de l'Est + de l'Ouest)	9	7.895	
Lignite	7	6.140	
Jiu tranchée Podari	23	20.175	
Affluents avec du charbon	22	19.298	
Affluents sans charbon	21	18.421	

A l'issu de cette dernière classification, nous ne rapporterons que les résultats de la méthode CHAID, qui est celle sur laquelle nous avons le plus confiance.

Encore une fois à l'arbre de décision, les trois mêmes indices colorimétriques ont contribué à sa ramification (*Figure X.13*).



**Figure X.13.** Arbres de décision de la classification à 7 catégories : les sédiments sur la rivière Jiu dans le secteur extra montan (en aval des gorges), les sédiments de la rivière Jilț, affluents drainant des zones charbonnières (autres que ceux du bassin de la rivière Jilț), les sédiments des autres affluents sans charbon, les sédiments de la tranchée de Podari, les sédiments de la Jiu de l'Ouest et de la Jiu de l'Est

Il est gratifiant de constater que les échantillons de sédiments de la tranchée à Podari sont effectivement classés dans la catégorie à part, compte tenu du pourcentage de reconnaissance de 78,3% de leur appartenance à la bonne catégorie. Les sédiments sur les affluents propres ont également été reconnus à 80%, tandis que les sédiments sur les deux branches de la Jiu dans le secteur superior restent avec un

faible pourcentage (33%); heureusement, ils ne sont pas confondus avec les sédiments des affluents, mais avec ceux de la même rivière Jiu, un peu en aval. La correspondance entre une partie des échantillons des alluvions de la tranchée de Podari et les sédiments des affluents propres, sans charbon, est intéressante. Normalement, nous nous serions attendus à ce que tout sédiment de la tranchée, s'il était confondu avec un autre échantillon, celle-ci devrait appartenir à la catégorie de ceux provenant de rivières traversant des zones carbonifères en raison de la couleur. Il s'agit en fait des première et troisième couche de la base du dépôt. Il se peut que lors de leurs dépôts, ces deux couches plus anciennes n'étaient probablement pas venues de telles crues qui auraient lavé les sols des bassins carbonifères.

### *10.2.1.3. Interprétation pour les possibles sources de sédiments et emploi futur*

Sur la base des distributions spectro-colorimétriques et des indices colorimétriques dérivées, cet ensemble de méthode à la base de la couleur et ses propriétés a utilisé des analyses de statistique descriptive et inférentielle pour caractériser les sédiments de la rivière Jiu et de ses affluents, tout en tenant compte aussi des échantillons de charbon des possibles zones sources de sédiments.

Une fois dressé un tableau global des indicateurs colorimétriques les plus appropriés pour comparer les échantillons de sédiments en amont et en aval, ou pour différencier les deux espèces de charbon, l'étape suivante consiste à élaborer des modèles prédictifs d'analyse des échantillons appartenant à une catégorie ou une autre. L'élément central n'était pas seulement le groupe de sédiments du dépôt alluvial de Podari, mais l'approche a également exploré les liens entre les sédiments et le charbon des possibles zones sources en amont avec leur transfert en aval. Cette approche est basée sur la construction d'arbres de classification à la base des caractéristiques colorimétriques des échantillons, en utilisant deux méthodes :

- CHAID (détection d'interaction automatique du chi carré)
- C&RT (Arbre de classification et de régression)

L'interprétation des arbres de classification est beaucoup plus facile que d'autres méthodes numériques, grâce à la représentation graphique disponible volontairement lors de leur calcul (les arbres de décision) et des matrices de confusion (les tableaux de synthèse de la prédictibilité des catégories).

Les six modèles de classification sont passés de 3 catégories à 7 catégories d'échantillons, en fonction de l'intérêt porté à une ou plusieurs zones sources. Le but ultime de ces classifications a été d'obtenir en fait la confusion entre les sédiments déposée au site de la tranchée de Podari et certains des sédiments dans les zones sources. De manière générale, il a été noté que le taux de prévisibilité diminue avec l'augmentation du nombre de catégories. La **Figure X.14** présente l'ensemble des résultats obtenus pour la méthode CHAID, qui a été plus efficace. Ponctuellement, certains résultats pourraient être pris en compte dans l'analyse des sources de sédiments à la tranchée de Podari, mais seulement en corrélation avec d'autres méthodes :

- Les échantillons de lignite ont été bien classés à 100%, ce qui signifie que la couleur de cette espèce de charbon est différente de toute autre classe ;
- Les échantillons de houille ont été partiellement confondus avec du lignite ; nous en pouvons tirer la leçon qu'il y a un risque à compter sur cette espèce en tant que prédicteur potentiel ou traceur sédimentaire ;



- Les échantillons de la rivière Jilț ont été assez bien classés à 50-60%, la confusion étant faite avec les sédiments d'autres affluents et non avec ceux de la rivière Jiu ; cependant, une relation entre les sédiments de la Jilț et les dépôts de la rivière Jiu n'a pas été possible à établir ;

- Il y a eu quelques confusions entre les sédiments de la Jiu de l'Est et de l'Ouest d'un côté et ceux de la rivière Jiu en aval ; d'autre côté cela peut signifier que les sédiments peuvent jouer le rôle de sources pour ceux descendus et déposés en aval.

		NO. OF SAMPLES CLASSIFIED			CORRECTNESS COEFFICIENT OF THE CLASSIFICATION		
from \ to	Tributary	Coal	Jiu	% correct			
Tributary	46	0	0	100.0%			
Coal	0	14	0	100.0%			
Jiu	5	0	49	90.7%			

from \ to	Coal	Motru - Rovinari	Jiu	Tributaries	% correct
Coal	14	0	0	0	100.0%
Motru - Rovinari	0	8	4	1	61.5%
Jiu	0	0	54	3	94.7%
Tributaries	0	2	5	23	76.7%

from \ to	Bituminous coal	Jiu	E & W Jiu	Lignite	Tributaries	% correct
Bituminous coal	2	0	0	5	0	28.6%
Jiu	0	45	0	0	2	95.7%
E & W Jiu	0	6	2	0	1	22.2%
Lignite	0	0	0	7	0	100.0%
Tributaries	0	12	0	0	32	72.7%

from \ to	Bituminous coal	Jiu	E & W Jiu	Lignite	Tributaries with coal	Tributaries without coal	% correct
Bituminous coal	2	0	0	5	0	0	28.6%
Jiu	0	46	0	0	1	1	95.8%
E & W Jiu	0	6	3	0	0	0	33.3%
Lignite	0	0	0	7	0	0	100.0%
Tributaries with coal	0	6	1	0	14	1	63.6%
Tributaries without coal	0	5	0	0	1	15	71.4%

from \ to	Bituminous coal	Jiu River	E & W Jiu	Lignite	Jiu riverbank at Podari	Tributaries with coal	Tributaries without coal	% correct
Bituminous coal	2	0	0	5	0	0	0	28.6%
Jiu River	0	25	0	0	0	0	0	100.0%
E & W Jiu	0	4	3	0	2	0	0	33.3%
Lignite	0	0	0	7	0	0	0	100.0%
Jiu riverbank at Podari	0	2	0	0	18	1	2	78.3%
Tributaries with coal	0	5	1	0	2	13	1	59.1%
Tributaries without coal	0	1	0	0	2	1	17	81.0%

Figure X.14. Récapitulation des résultats des 6 classifications avec la méthode CHAID

- Les sédiments de la tranchée à Podari semblent avoir une marque distinctive, car seuls deux couches dans la base de dépôt ont été confondus (celles-ci étaient considérées comme provenant d'affluents propres qui ne traversaient pas les zones d'exploitation du charbon) ; du point de vue hydrologique, une telle relation entre les sédiments en base de la tranchée et certains rivières affluents sans charbon ne semble pas illogique ; en effet, les premières couches de la base de la tranchée ne sont pas considérées comme ayant été formées par des crues aussi violentes qu'elles pourraient attirer une grande quantité de charbon, mais par des petites crues qui ont entraîné des sédiments plus propres en termes de teneur en charbon.

- Au niveau des sédiments des affluents de la rivière Jiu, leurs caractéristiques colorimétriques ont souvent été interchangées (les sédiments des affluents propres ont été inclus dans la classe des affluents qui drainent les bassins carbonifères et vice versa).

En ce qui concerne les indicateurs colorimétriques les plus utiles que les classifications, nous pouvons mentionner  $L^*$ ,  $h$  et  $a^*$ .

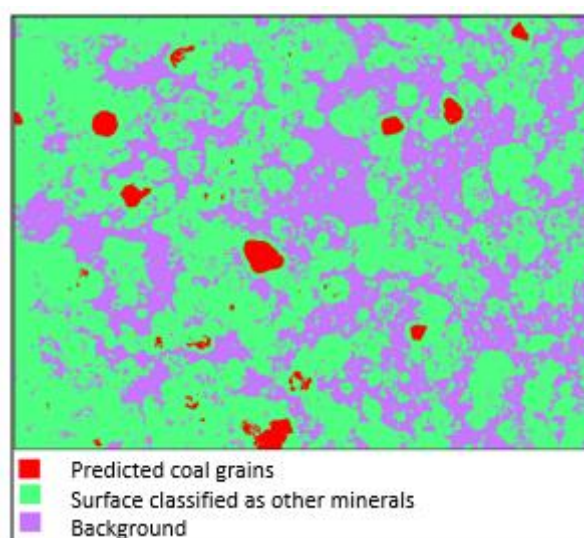
Lors de l'attribution des sources possibles de sédiments déposés en aval de Podari, nous prendrons en compte en second les résultats de l'analyse colorimétrique, qui, bien qu'intéressante en tant qu'approche méthodologique, n'ont pas amélioré la relation directe entre les couches sédimentaires et une zone particulière des source possibles.

### 10.2.2. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval et échantillonnés en amont par l'analyse d'image

La méthodologie développée pour l'analyse d'image a été présentée au §8.2.3 et consiste à mesurer une "densité" de particules de charbon par rapport à la surface occupée par les autres types de particules, dans un échantillon de sédiment donné. Il n'y a pas de place pour rappeler le flux de travail (obtenir les images de chaque échantillon sous la loupe binoculaire, leur traitement en FijiJ et la mesure de la quantité apparente de charbon), mais il faut quand même mentionner que, pour chaque échantillon de sédiment, nous avons effectué 3 mesures et le pourcentage final de la surface occupée de particules de charbon est une moyenne des trois résultats partiels. Une information supplémentaire que nous devrions peut-être rappeler est l'échelle de travail, 5 fois la dimension d'une particule de sédiment réelle est ce que nous pouvons voir à travers la loupe du binoculaire. Au total, 50 échantillons de sédiments ont été soumis à l'analyse.

Dans ce qui suit, nous présenterons la variation de la teneur en charbon selon la méthode d'analyse d'image et nous comparerons les résultats ultérieurement avec le pourcentage de charbon réel déterminé par les analyses géochimiques. Pour ne pas confondre cette mesure avec la vraie teneur en charbon, nous allons l'appeler „*densité de grains de charbon*” (DGC).

Ainsi, en aval, la DGC des échantillons de sédiments de la tranchée à Podari est illustrée sur la *Figure X.15*.

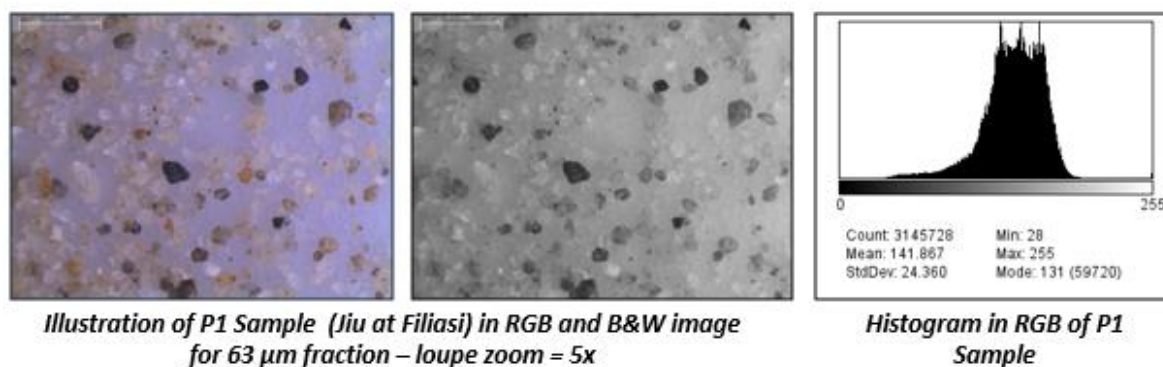


**Figure X.15.** Résultats de l'analyse d'image pour les sédiments à la tranchée aval à Podari

Nous pouvons noter que la densité moyenne des grains de charbon ne suit pas une tendance spécifique et que le maximum correspond à une couche à la base de la tranchée, P<sub>2</sub> (19,6%), suivie d'un

échantillon de la couche centrale, P<sub>6</sub> (17.2%), puis de la plus récente, P<sub>11</sub> (16,8%). Nous n'excluons pas la possibilité que le placement des granulés sur la plaque de taille standard ait favorisé la distribution de la fraction de charbon, de sorte que le pourcentage obtenu par l'analyse d'image ne soit pas représentatif. Au cours de cette phase, nous ne pouvons pas améliorer davantage l'analyse car cette méthode est encore exploratoire. De plus, nous n'avons pas encore fourni le temps et les ressources techniques nécessaires pour étudier la possibilité d'une meilleure manipulation de la distribution des grains d'échantillon sur la surface de la plaquette, de manière à ce que la mesure soit effectuée correctement.

Les résultats des analyses d'images des sédiments prélevés en amont de Podari, dans les zones sources, sont présentés sur la **Figure X.16** pour chaque sous-bassin hydrographique.



**Figure X.16.** Exemple de résultats de l'analyse d'image pour les sédiments des rivières en amont de Podari, à la s.h. Filiași

Après une analyse visuelle des images, nous pouvons observer des différences de taille et de forme des grains de charbon entre les sédiments de l'amont et de l'aval déposés sur la rive de la Jiu à Podari. En amont, à l'exception des échantillons provenant de quelques zones de dépôt de sédiments (les réservoirs Ceauru et Ișalnița) et des rivières drainant des terres situées à proximité immédiate des zones minières, le charbon est plus fin. Au contraire, dans les sédiments des couches alluviales déposées à Podari, nous pouvons voir des grains de charbon de toutes tailles, en particulier les plus grossiers.

En amont, la densité des grains de charbon est plus élevée en aval des champs d'extraction du lignite et sur la Jiu de l'Ouest en aval de Vulcan. Plusieurs endroits où nous rencontrons également de grandes densités de granulés de charbon sont des zones basses favorisant l'accumulation des sédiments et des zones de confluence avec la rivière Jiu, où le charbon résulte de la remue sur les affluents.

Nous concluons que la méthode de détermination d'un contenu apparent (sur critères visuels) des grains de charbon par l'analyse d'image peut être efficace que si les grains de sédiments et de charbon aient de contours distincts et soient de dimensions suffisamment grandes pour les distinguer à une augmentation de l'image de 5 fois la dimension réelle. Le succès de l'analyse d'image dépend, ainsi, de la granulométrie des sédiments qui est liée, à son tour, de la texture du matériel fin constituant.

Dans le cas des échantillons de sédiments de la rivière Jiu, provenant de sources bien différentes de tout l'amont, les graines sont dans la plupart détachées et peuvent être même comptées sur une planche en papier. Les échantillons de quelques affluents, par contre, comme c'est le cas des sédiments provenant du bassin de la rivière Jilț, contiennent des granules de la même couleur (jaune – verte), de texture limoneuse, de contour difficilement à distinguer, qui occupent des larges parties de la planche, pouvant cacher derrière d'autres granules de lignite. Par conséquent, l'analyse d'image peut être utilisée comme

indicateur d'une densité apparente des granules de charbon parmi ceux de sédiments de différentes origines, mais la qualité et la vérité des résultats dépend d'un grand nombre de facteurs : a) que les sédiments de l'endroit de l'échantillonnage soient composés de granules de taille, texture et origine bien différentes ; b) que les couleurs et les formes des granules soient différentes ; c) que les granules de sédiments ne soient pas en cohésion, afin de ne pas cacher devant la pellicule qu'elle forment les granules de charbon ; d) qu'il y ait un nombre suffisant de mesures pour un seul échantillon, afin d'obtenir une moyenne de cette valeur de densité représentative.

### 10.2.3. Correspondance entre les caractéristiques des sédiments déposés à l'aval et échantillonnés en amont par la pétrologie organique

L'objectif de cette analyse est d'explorer la relation entre les zones sources de sédiments et les différents types de matière carbonneuse que nous trouvons dans les sédiments fins de la rivière Jiu.

Grâce à l'approche de la pétrologie organique, nous avons changé d'échelle et nous sommes allés à 50 fois la dimension d'une particule réelle. L'analyse des grains de charbon de cette taille nous a permis de mesurer leurs caractéristiques internes, telles que la réflectance (qui est directement proportionnelle avec le rang du charbon) et la composition macérale, également connue sous le nom d'analyse pétrographique.

Pour le rappel des principes de mesure et protocole de laboratoire suivi, voir le chapitre §8.2.4.

#### 10.2.3.1. La réflectance ( $R_r$ )

Dans le domaine de la pétrologie organique, la réflectance est en fait la lumière réfléchi qui revient au microscope après une stimulation des macéraux, généralement dans l'infrarouge. La vitrinite et, s'il manque dans les charbons de bas rang, l'huminite, sont les macéraux utilisés pour prendre cette mesure. Souvenons-nous du chapitre §8.2.4 que les macéraux sont les plus petites entités organo-pétrographiques reconnaissables dans le charbon et d'autres sédiments à l'aide du microscope optique.

Afin de mesurer la réflectance, nous avons effectué les 100 mesures sur chacun des 34 échantillons de sédiments (11 provenant du dépôt alluvial de la tranchée T<sub>aval</sub> de Podari et 23 échantillons prélevés des lits des rivières en amont) et 11 échantillons de charbon (8 échantillons de charbon prélevés du Bassin Petroșani et 3 échantillons du Bassin Motru - Rovinari) et nous avons calculé les valeurs moyenne, minimale, maximale et de l'écart type (**Tableau X.13** - échantillons environnementaux et **Tableau X.14** - échantillons de charbon).

**Tableau X.13.** Les statistiques générales des mesures de réflectance sur les échantillons environnementaux

Notation	Nom	Ecart type	Moyenne	No.particules
A	Podari P1	0.177	0.6	100
B	Podari P2	0.139	0.654	100
C	Podari P3	0.1	0.57	100
D	Podari P4	0.138	0.549	100
E	Podari P5	0.09	0.61	100
F	Podari P6	0.115	0.595	100
G	Podari P7	0.113	0.606	100
H	Podari P8	0.134	0.625	100
I	Podari P9	0.131	0.621	100
J	Podari P10	0.115	0.614	100

K	Podari P11	0.116	0.627	100
L	Podari P12	0.099	0.584	100
M	Podari P13	0.164	0.387	8
N	Timișeni	0.053	0.276	100
O	Jilț Turceni	0.046	0.256	27
P	Vallee Racilor amont	Pas de mesures (pas assez de charbon)		
Q	Jiu Podari	Pas de mesures (pas assez de charbon)		
R	Valley Racilor Urdari	0.069	0.291	29
S	Jieț Lonea	0.157	0.495	13
T	Jiu West Paroșeni	0.114	0.599	58
U	Jiu West Bridge Aninoasa	0.083	0.576	16
V	Jiu upstream Bumbești	0.078	0.564	48
Y	Jieț Ostroveni	0.061	0.344	10
Z	Tehomir	Pas de mesures (pas assez de charbon)		
31	Jiu Zăval	0.041	0.506	5
36	Ceaureu Reservoir	0.09	0.618	100
72	Jiu Ișalnița	0.125	0.59	77
74	Jiu Bucovat	0.13	0.6	51
75	Jiu Bridge Filiași	0.109	0.62	76
76	Fața Motrului	0.143	0.314	28
79	Jiu Rovinari	0.108	0.66	100
85	Sadu confl. Jiu	0.052	0.345	3
88	Jiu Gorge	0.112	0.664	37
89	Jiu East upstream Lonea		-	
91	Gilort Bridge	0.198	0.385	33

**Tableau X.14.** Les statistiques générales des mesures de réflectance sur les échantillons de charbon

Notation	Nom site	Ecart type	Moyenne
L1	Lupoia	0.04	0.32
H1	Vulcan	0.048	0.635
L2	Fărcășești	0.04	0.53
H2	Lonea	0.03	0.34
H3	Jiu aval Gambrinus	0.07	0.52
H4	Paroșeni centrale thermique	0.053	0.586
H5	Aninoasa	0.051	0.623
H6	Geological outcrop		
H7	Jieț 2	0.03	0.46
L3	Rovinari tas de stérile	0.03	0.31
L4	Coșuștea	0.044	0.273
H8	Jiu Iscroni	0.04	0.48

Les échantillons de charbon des zones sources n'ont pas couvert toute la plage de valeurs de réflectance que nous pouvions trouver dans les échantillons de sédiments en aval, le maximum de réflectance étant de 0,7%, alors que dans les sédiments en aval du dépôt alluvial de Podari, il y avait aussi des particules de charbon avec une réflectance supérieure à 0,8%. La **Figure X.17** présente la réflectance ( $R_r$ ) de quelques échantillons couvrant toute la zone de source et de dépôt des sédiments.

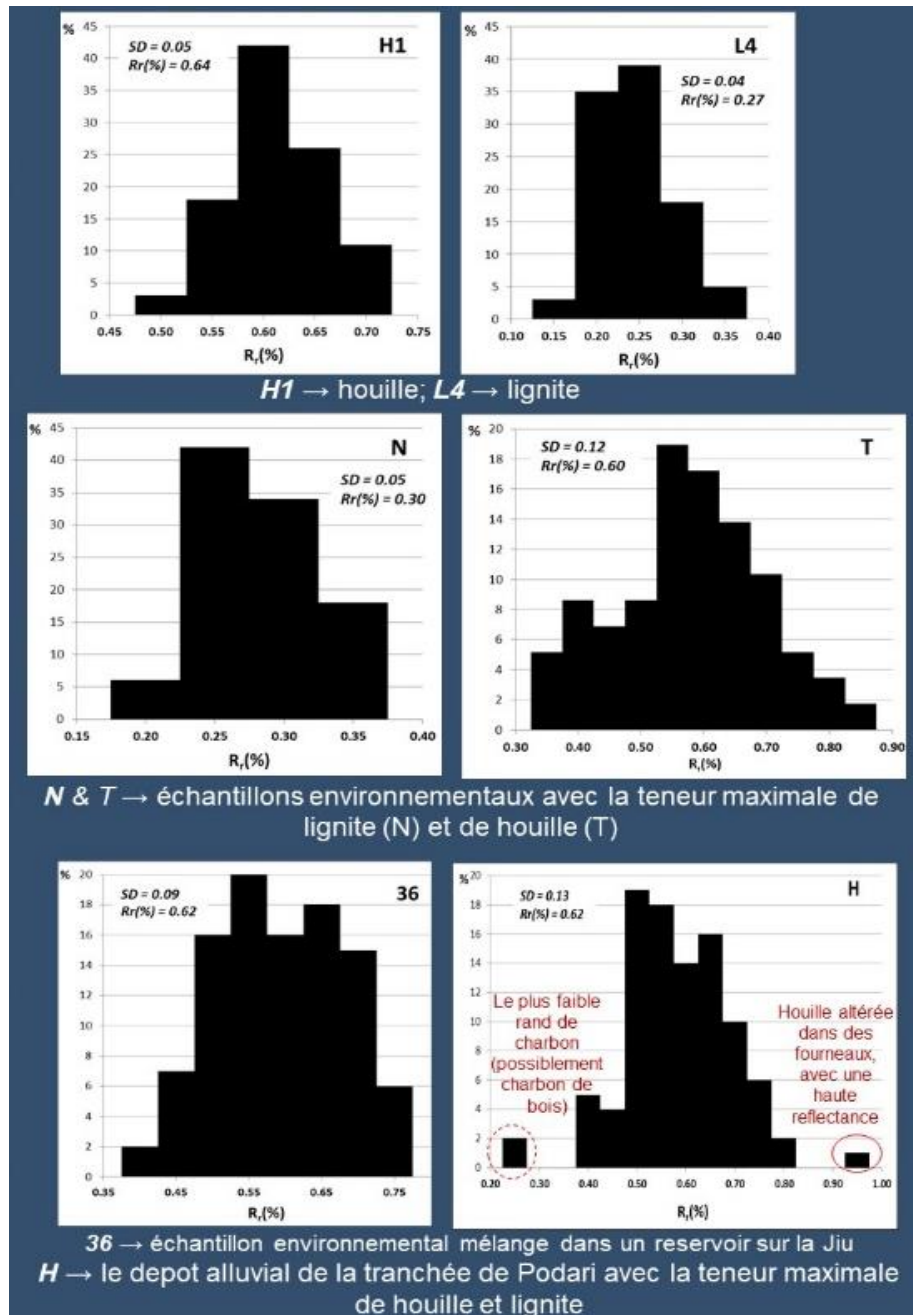
En amont, sur les affluents, le lignite est présent dans quelques échantillons provenant du sous-bassin de la rivière Jilț, dans le secteur moyen du bassin de la rivière Jiu:



- La Vallée de Timișeni ( $R_r = 0,31\%$ ) ;
- Les rivières Motru et Valea Racilor avec une réflectance ( $R_r$ ) de  $0,31\%$ , respectivement de  $0,29\%$ .

Toujours en amont, la houille a été présente uniquement dans quelques échantillons du secteur montagneux en amont du bassin de la rivière Jiu:

- La réflectance maximale ( $R_r$ ) sur la Jiu de l'Ouest, en aval de la centrale thermique de Paroșeni est de  $0,64\%$ ;



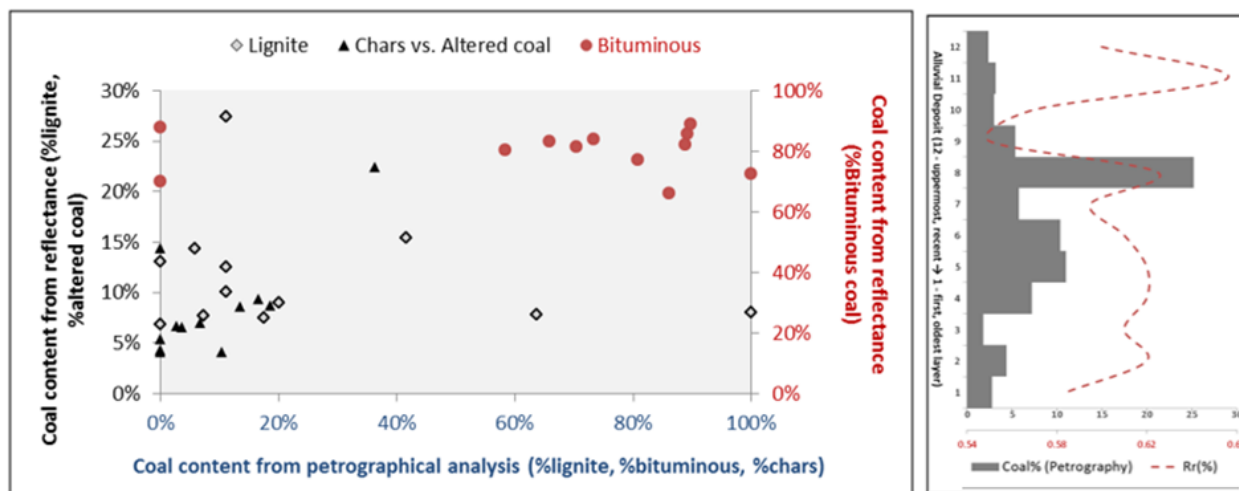
**Figure X.17.** Exemples de réfectogrammes de la matière carbonneuse des zones de source et de dépôt ( $R_r$  (%) - réflectance moyenne, SD - écart type)

- En aval du bassin carbonifère de Petroșani, des valeurs de réflectance élevées ont été trouvées dans les échantillons de sédiments prélevés des réservoirs (l'échantillon du réservoir Ceauru présente une réflectance maximale supérieure à  $0,75\%$ ).

Selon l'analyse de réflectance réalisée sur les échantillons de charbon brut provenant de la partie orientale de la Dépression de Petroșani, le charbon de la vallée de la Jiu de l'Est ne correspond pas à la

houille (comme il est présenté dans la littérature), mais il paraît correspondre à une espèce intermédiaire entre lignite et charbon inférieur. La réflectance maximale trouvée sur la Jiu de l'Est est de 0,5%, qui fait les échantillons de cette zone correspondre plutôt au lignite de qualité supérieure, qu'à la houille véritable.

En aval, les sédiments du dépôt alluvial de Podari ont une réflectance moyenne entre 0,55% et 0,65% et une réflectance maximale qui peut parfois atteindre 0,85% (**Figure X.18**).



**Figure X.18.** Le profil vertical des dépôts alluviaux de Podari : **a.** Corrélogramme entre le lignite, la houille et le charbon altéré dans les analyses pétrographiques / de réflectance ; **b.** Teneur totale en charbon (%) et  $R_r$  moyen (%)

Sur la base de l'analyse de réflectance des macéraux de charbon, nous pouvons estimer la teneur en charbon dans un échantillon. En ce qui concerne les échantillons de sédiments de la tranchée  $T_{\text{aval}}$  de Podari, cette mesure de la quantité de charbon appréciée par réflectance augmente avec la quantité de houille pour atteindre 0,64% dans la couche  $L_2$  et 0,625% dans la couche  $L_8$ . Mais à part les macéraux de charbon qui n'ont pas souffert des processus d'altération (thermique, aérienne, en milieu riverain), la réflectance a été mesurée aussi sur le vitrinite des particules altérées. En lumière réfléchie, les particules carbonisées / altérées présentent une réflectance supérieure (environ 0,85%) avec le maximum pour les particules de charbon bitumineuses non modifiées (environ 0,8% dans les échantillons environnementaux et 0,7% dans les échantillons de charbon en vrac). Pour une telle couche, la matière carbonieuse provient probablement de sources diverses des deux zones d'extraction du charbon.

Il y a deux hypothèses pour expliquer cette différence :

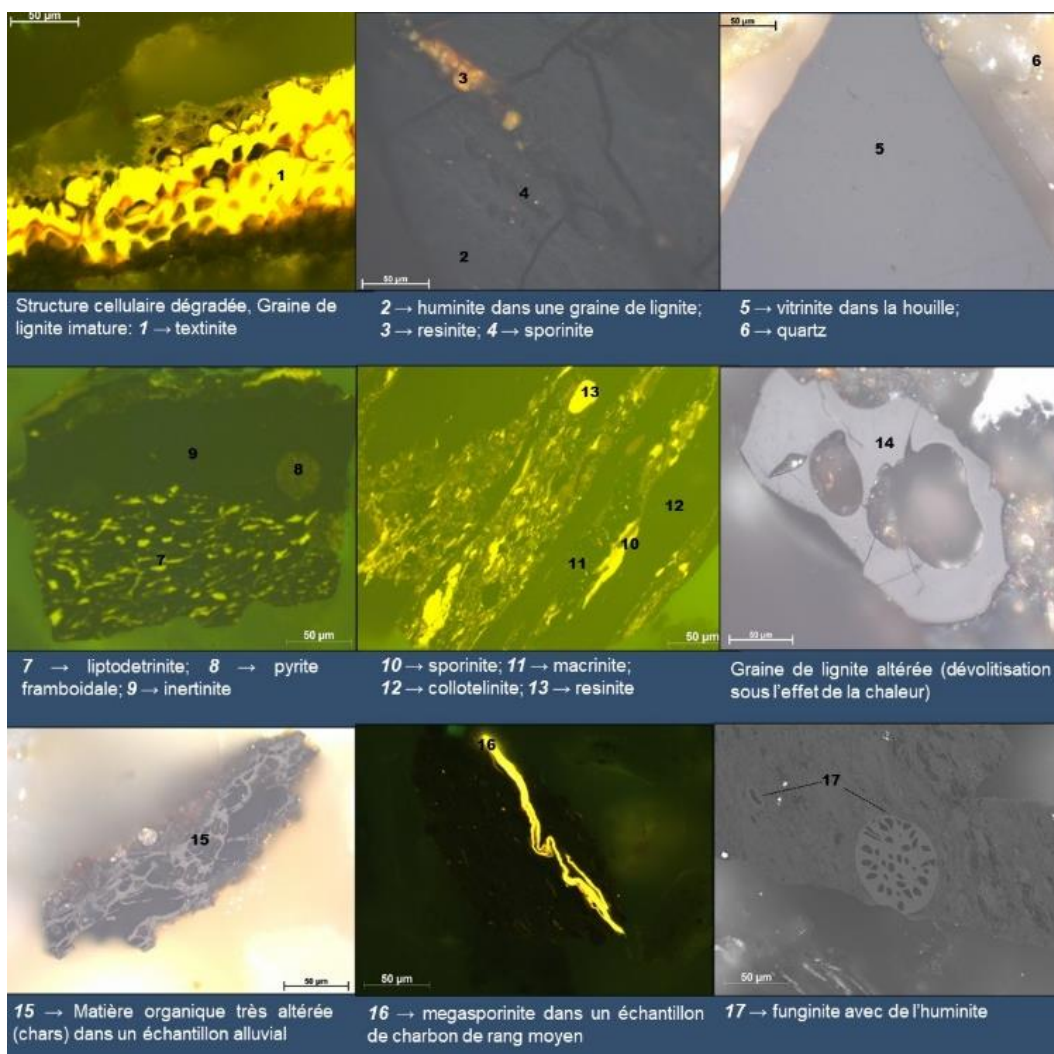
1. Les échantillons de charbon et de sédiments environnementaux prélevés dans les zones sources en amont ne comprennent pas toutes les sources et il pourrait y en avoir d'autres sources livrant du charbon de qualité supérieure dans le système fluvial, que nous n'avons pas échantillonné ;

2. Les particules de charbon de haut rang provenant du dépôt alluvial de Podari ne sont pas y arrivées seulement par des processus habituels de lavage du charbon et de rejet ultérieur dans les rivières après son extraction des mines souterraines, mais il pourrait y avoir des processus de modification physique (altération) ou thermique entre les deux moments (élimination de la source et dépôt dans le milieu fluvial) ; cette hypothèse n'exclut pas le fait que toutes les particules ayant une réflectance supérieure à toutes les valeurs trouvées dans les échantillons en amont ( $R_r > 0,75\%$ ), proviennent de processus d'altération thermique dans les centrales thermoélectriques utilisant le charbon comme combustible.

### 10.2.3.2. L'analyse pétrographique

Les analyses pétrographiques ont servi à comparer le contenu en lignite, houille et macéraux altérés entre les échantillons provenant des zones sources de sédiments et les échantillons des couches alluvial du dépôt de Podari. Dans les échantillons environnementaux (les échantillons de sédiments), tous les 3 groupes macéraux ont été identifiés (**Figure X.19**).

Les pourcentages reportés correspondent au nombre de macéraux d'un certain type par rapport au nombre total de particules analysés au-dessous du microscope (500 de particules classées dans une des catégories suivantes : huminite / inérintite, liptinite, inertinite, macéraux altérés<sup>47</sup> et particules non-organiques qui proviennent du sédiment de base de différentes origines).



**Figure X.19.** Photomicrographes de microscopie optique. Exemples de macéraux identifiés dans des échantillons de sources (en amont: charbon brut, lit de rivière / environnement) et de dépôts alluviaux (en aval: profil de la rivière Podari). Les microphotographies ont été prises en lumière blanche réfléchie et en mode de fluorescence avec l'objectif d'immersion dans l'huile 50×

Parmi les 34 échantillons de sédiments analysés 10 ont présentés seulement des particules minérales (500/500), ceux-ci ne pouvant être utilisés à la suite pour les analyses comparatives de la matière organique entre les échantillons de la tranchée de Podari et des rivières en amont. Le pourcentage de particules organiques le plus élevé appartient à l'échantillon de la Vallée de Timișeni évoquée dans le sous-chapitre précédent comme ayant une des plus bases réflectances (à cause de la dominance de l'huminite

<sup>47</sup> Les macéraux altérés sont plus connus sous le terme anglais de « chars »

dans la composition macérale du lignite). Les échantillons de charbon ont tous présenté une grande quantité de matière organique (entre 28% et 97,2%), à l'exception d'un échantillon rocheux prélevé d'une ouverture de versant sur la vallée de l'affluent Rostovanu de la Jiu de l'Ouest, considéré au début comme étant une couche de charbon brut à jour. En réalité, l'échantillon a une origine minérale.

Le groupe de macéraux huminite / vitrinite a été le plus fréquent, avec une moyenne de 3,5%. La quantité maximale d'huminite était de 22,6% dans un échantillon environnemental prélevé dans un affluent de la rivière Jiu drainant une des zones en aval des carrières de lignite du Bassin Motru - Rovinari, et la quantité maximale de 16,2% dans l'une des couches du dépôt alluvial de la rivière Jiu. Les macéraux de liptinite et d'inertinite ont été moins présents (<1% en moyenne), avec un maximum de 2% de liptinite (pour le même affluent qu'en haut) et 0,8% d'inertinite (pour l'échantillon provenant de la même couche de la tranchée de Podari). Ce même échantillon de sédiment (de la Vallée de Timișeni) présente aussi un pourcentage assez élevé de matière organique altérée (1,4%), comparable à celle de quelques couches alluviales de la tranchée de Podari (L<sub>2</sub>, L<sub>6</sub>, L<sub>8</sub>). D'ailleurs, les échantillons de L<sub>2</sub> et L<sub>8</sub> sont aussi les seules avec des pourcentages supérieurs à l'unité de lignite (2,8% respectivement 4,4% lignite dans ces deux échantillons). Or la matière organique de l'échantillon L<sub>2</sub> est composée uniquement de lignite et particules altérées, car aucun contenu de houille n'a pas été identifié par l'analyse pétrographique. On souligne l'importance cruciale de ce résultat, qui nous conduit à une première piste sur la possible zone source prédominante de la deuxième couche. Les conclusions sur cette couche ne sont pas encore finales, car on attend aussi les résultats de l'analyse géochimique (et parce qu'on est conscients que les échantillons prélevés ne couvrent pas toute la zone source potentielle des sédiments), mais on garde à l'esprit cette piste pour une éventuelle mise en relation avec la spéciation du charbon par les moyens de la densité (§10.2.3.3.). L'autre échantillon donnée comme exemple, L<sub>8</sub>, contient aussi la plus grande quantité de houille (16,4%), ce qui signifie que les sources des grains de sédiments composants proviennent, en parties considérables, aussi du Bassin de lignite Motru – Rovinari, que du Bassin de houille Petroșani.

### *10.2.3.3. Synthèse de l'analyse pétrologique*

Dans cette étude, les mesures de réflectance et pétrographiques ont été faites pour les échantillons de charbon et de sédiments collectés du bassin de la rivière Jiu. L'analyse pétrologique a permis d'identifier les particules des deux espèces de charbon (lignite et houille) dans l'aval, dans les couches sédimentaires de la tranchée T<sub>aval</sub> à Podari, issues des processus naturels ou des activités anthropiques d'exploitation du charbon. Une teneur variable en charbon et en particules de charbon altérées a été trouvée, avec une réflectance généralement élevée ( $R_r > 0,8\%$ ). La présence de ces particules est caractéristique pour les échantillons provenant des couches de sédiments la tranchée à Podari (entre 0,2% et 4,2%), tandis que la matière organique altérée a été identifiée en moindre proportion dans quelques échantillons prélevés de la Jiu dans des endroits propices à l'accumulation des sédiments fins (réservoirs) et en général situés en aval des centrales thermoélectriques qui fonctionnent à la base du charbon. La Vallée de Timișeni, où on a trouvé des sédiments mélangés avec des particules de lignite, est le seul affluent du Bassin Motru – Rovinari caractérisé par l'occurrence des particules organiques altérées.

L'origine de la matière carbonneuse ne semble pas être uniforme, comme le montre la faible répartition de la réflectance moyenne du vitrinite / huminite (0,4% – 0,6%), ainsi que les différentes proportions d'huminite / vitrinite et d'autres groupes macéraux.

Il existe un accord général entre les analyses pétrographiques et de réflectance dans l'estimation de la teneur en lignite et en houille, à l'exception des confusions existant entre le charbon sous-bitumineux du bassin de la Jiu de l'Est et le lignite du Bassin Motru – Rovinari, étant données leurs valeurs de réflectance similaires <0,5%.

En conclusion de cette partie, la pétrologie organique a révélé la présence de particules carbonneuses dans les sédiments fins de la rivière Jiu, ouvrant ainsi une piste de recherche pour la détermination de l'origine de la composante organique naturel / anthropique dans les sédiments déposés en aval (dans le chantier de la tranchée de Podari).

#### **10.2.4. Résultats des analyses géochimiques**

Comme anticipé dans le chapitre §8.6, les analyses géochimiques ont concerné deux aspects opérationnels : **1)** pour déterminer le contenu de charbon dans les sédiments de la tranchée aval de Podari et certains sédiments des zones sources amont (cet aspect comporte à la fois - **1.1** - l'isolation du contenu total du charbon dans les échantillons ayant moins de 3g de charbon<sup>48</sup>, généralement tous ceux qui proviennent des lits des rivières, et **1.2** - la séparation des deux espèces de charbon – lignite et houille – sur la base de la différence de densité, suivant le protocole détaillé dans le §8.6.1., pour les échantillons de la tranchée de Podari, avec un contenu total de charbon supérieur à 3g) et **2)** pour déterminer le contenu en minéraux/ métaux lourds (**2.1**) et en lanthanides / terres rares (**2.2**) de la plupart des échantillons de sédiments amont et aval, suivant le protocole détaillé dans le chapitre §8.6.2.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats en fonction de l'analyse de laboratoire mise en place et nous allons les mettre en correspondance dans la synthèse finale de ce sous-chapitre, afin d'esquisser autant que possibles la carte mentale des sources potentielles de sédiments, selon les approches géochimiques.

##### **10.2.4.1. Le contenu en charbon et la spéciation houille – lignite**

L'analyse portant sur le contenu en charbon a été faite sur 36 échantillons de sédiments provenant des lits des rivières, considérées comme sources ou zones de transfert potentielles des alluvions, ainsi que sur les 11 échantillons des couches sédimentaires de Podari.

Les échantillons prélevés des lits des rivières contiennent en moyenne 0,8% de matière carbonneuse. L'écart du contenu de charbon est quand même assez large, de 0,006% (concernant un des échantillons de la Vallée Racilor) à 5,75% (sur la rivière Lupoiaia, affluent de la Motru, qui draine un des champs d'exploitation du lignite). Dans le Bassin Motru – Rovinari, il y a un seul autre échantillon dont la teneur en charbon dépasse l'unité, celui d'une rivière dans la proximité de la carrière de Timișeni (4,4%).

---

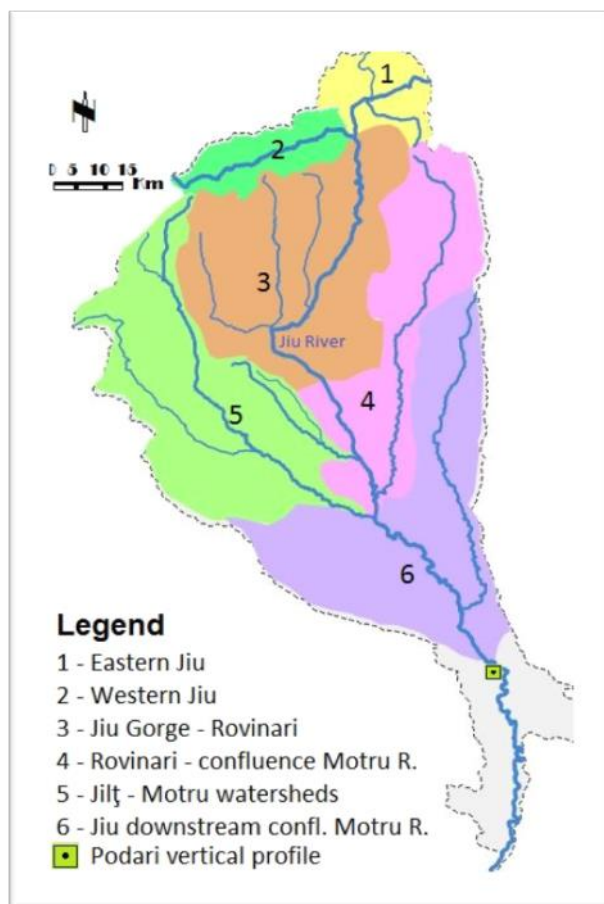
<sup>48</sup> Il convient de noter que, mêmes si l'échantillon de sédiment prélevé d'une rivière en amont de la tranchée a une quantité de charbon supérieure à 3g, dans le cas où sa localisation géographique dans un bassin d'exploitation de charbon est exacte (la rivière draine le bassin de lignite Motru – Rovinari ou celui de houille/ charbon bitumineux ou sous-bitumineux de Petroșani), l'analyse de spéciation n'est plus nécessaire (on connaît *a priori* l'espèce de charbon).



Dans la **Figure X.20** nous présentons les 6 zones homogènes du point de vue géochimique d'où nous avons prélevé et analysées des échantillons de sédiments.

**Figure X.20.** Regroupement des points d'échantillonnage en 6 zones reflétant les principales caractéristiques géologiques et l'espèce de charbon

Dans le secteur supérieur de la rivière Jiu, la partie occidentale du Bassin Petroșani, l'échantillon prélevé de l'affluent de la Jiu de l'Ouest, le ruisseau Mierlosu, est le seul dont le contenu en charbon dépasse l'unité en pourcentage (3,2%). Cette quantité peut être expliquée par le fait que cet affluent est alimenté par des sédiments détachés d'un glissement de terrain installé sur un tas de stérile assez étendu sur le versant nord de la ville de Bărbățeni<sup>49</sup>. On souligne ici l'effet du relief anthropique construit dans la proximité des mines (les tas de stérile instables, formée de larges matériaux d'origine minière) et des processus géomorphologiques apparus sur ce type de constructions.



La distribution de la quantité de charbon trouvé dans les sédiments de la rivière Jiu et des affluents se trouve dans la **Figure X.21**. La question liée au transport et au transfert de ces sédiments en aval se pose de la façon suivante : *est-ce que cette petite rivière peut devenir une source importante d'alluvions pour la rivière Jiu et jusqu'à quelle distance une quantité donnée de sédiments mélangés de charbon peuvent voyager dans ce système fluvial ?* Pour essayer de répondre à cette question, le seul moyen est de vérifier la quantité de charbon sur la rivière Jiu de l'Ouest aval de la confluence et ensuite sur la Jiu, dans le secteur des gorges. On voit dans la **Figure X.21** que la quantité totale de charbon dans les échantillons de sédiments prélevés immédiatement en aval de la confluence entre la rivière Jiu de l'Ouest et le ruisseau Mierlosu est très petite (décroissant de 0,76% à Iscroni – 3 km en aval de la confluence à 0,18% dans les gorges, amont Bumbști Jiu). Même si une seule mesure basée sur une seule Campagne d'échantillonnage pendant une période de régime hydrologique de bases à moyens eaux ne suffit pas pour conclure sur une possible relation source – transfert des sédiments, nous pouvons constater qu'il n'existe pas une forte liaison entre le petit affluent Mierlosu et la rivière Jiu. Au risque de trop insister, le régime hydrologique<sup>50</sup> et la fréquence de l'échantillonnage s'avèrent être des points clé dans une telle démarche, afin de surprendre toute possible

<sup>49</sup> Nous avons montré le glissement de terrain installé sur le tas de stérile du bassin versant du ruisseau Mierlosu sur une photo aérienne au chapitre §4.2.

<sup>50</sup> Le cas idéal serait d'organiser une campagne d'échantillonnage dans les jours suivant une grosse crue

contribution des affluents et activités anthropiques liées à l'exploitation du charbon dans la formation et le transfert des sédiments.

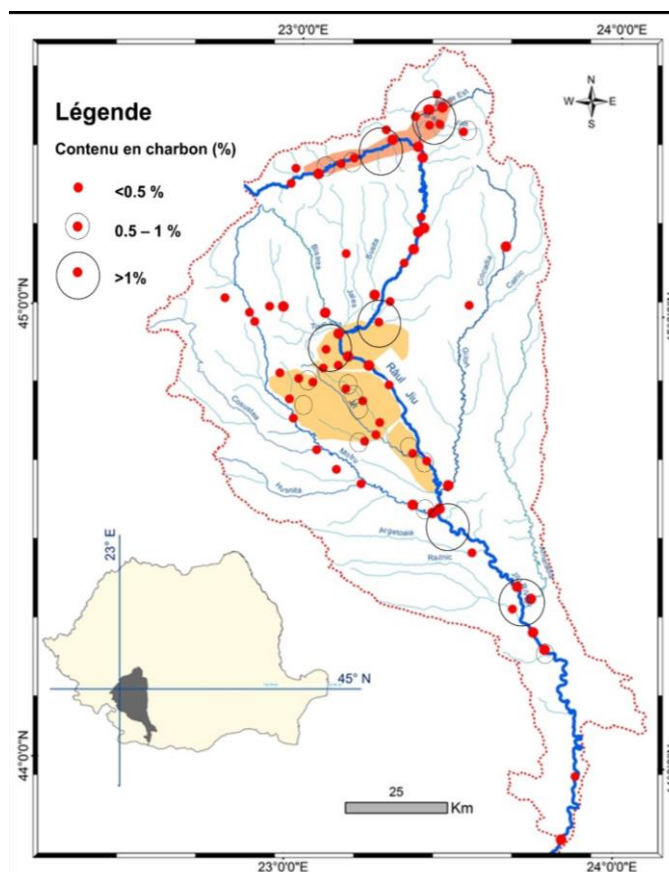


Figure X.21. Les quantités de charbon trouvées dans les alluvions prélevées

Toujours dans le secteur supérieur de la rivière Jiu, la partie orientale du Bassin Petroșani semble contribuer davantage avec des sédiments fins, au moins si on prend comme témoin la teneur en charbon total. Dans ce secteur, la rivière Jiu de l'Est apporte entre 1,76% (amont de la confluence avec son affluent Lonea, au droit de la mine de Lonea) et 2,51% charbon (à Livezeni, 2 km amont de la confluence avec la Jiu de l'Ouest). On pourrait être tenté de caractériser la Jiu de l'Est comme un contributeur important de sédiments si cela n'était pour une prise en considération à la fois des facteurs anthropiques et naturels à la formation de ces sédiments qui arrivent dans le système fluvial. Même si une assez grande quantité de charbon est lavée et éliminée par la suite dans la rivière, cette information fournie par la géochimie du charbon ne justifie pas totalement une possible contribution massive de cette rivière à l'apport des sédiments fins dans la Jiu. On se souvient du chapitre §3.3 que la vallée de la rivière Jiu de l'Est draine dans la plupart de son bassin versant des formations dures d'origine métamorphiques (micaschistes et paragneisses)<sup>51</sup> et seulement dans le secteur inférieur, la vallée s'élargit dans les sédiments paléogènes (marnes, argiles, grès). Donc, à part quelques secteurs développées sur des formations plus friables, d'origine sédimentaire, la Jiu de l'Est ne présente pas le potentiel élevé d'érosion. Les alluvions qui se forment dans ce secteur doivent provenir surtout des dépôts de vallée ou des activités anthropiques d'exploitation du charbon.

<sup>51</sup> Voir la carte géologique détaillée de l'Annexe 1

Sur la rivière Jiu dans son secteur extra-carpatique, la teneur en charbon connaît une croissance vers l'aval, entre 0,27% à Rovinari, 1% à Filiași et 2% à Ișalnița. On observe, ainsi, que lorsqu'on s'éloigne de la principale zone source potentielle des sédiments (le secteur montagneux de la rivière Jiu), les sédiments échantillonnés contiennent plus de charbon. Nous avons essayé d'expliquer cet enrichissement en charbon avec la distance, en apportant plusieurs arguments qui s'enchaînent dans une logique amont – aval et processus/ conditions naturels - anthropiques :

**1.** Entre la sortie des gorges et Rovinari, la rivière Jiu traverse une zone de pente faible par rapport à celle des montagnes, qui favorise le dépôt dans le lit et, à l'occasion des crues débordantes, le dépôt dans la plaine alluviale des sédiments chargés de matière carbonneuse.

**2.** Quelques kilomètres en amont de Rovinari (sur le territoire administratif de la ville de Târgu Jiu) il y a les réservoirs Vădeni et Târgu Jiu qui sont rapportés dans la littérature comme étant colmatés dans une mesure considérable, jusqu'à 80% au niveau des années 2000 [Rădoane, 1999]. L'épaisseur des dépôts alluviaux dans ces réservoirs est tout à fait visible sur le terrain aussi, dans les périodes à bas débit leurs cuvettes étant remplies de sédiments atteignant le niveau de l'eau. Encore plus en aval, ces deux réservoirs qui ont stocké des sédiments à partir des années '70 sont précédés récemment de trois autres en construction (Valea Sadului, Curtisoara et Turcinesti), qui se succèdent en cascade et dont les travaux de mise en fonctionnement supposent aussi l'élargissement du lit majeur de la rivière Jiu, le contrôle de la pente et le barrage en vue du stockage de l'eau et, en conséquence, le dépôt des sédiments provenant de l'amont (pour plus de détails sur le schéma des aménagements dans ce secteur, consultez le chapitre §3.9). Dans ces conditions, la rivière Jiu peut rester longtemps dans l'année dépourvue des grandes quantités de sédiments d'origine carpatique (naturelle ou anthropique - de la houille du bassin de Petroșani), car les alluvions sont dans leur majorité trappées derrière tous ces barrages. Seulement en cas de crues, les sédiments plus fins sont-ils en grande partie évacués en aval, d'où la quantité assez élevée de charbon qu'on a pu identifier dans le chapitre §9.1 dans les couches alluviales de la tranchée à Podari (entre 1,35% et 10,27%) par rapport à la teneur en charbon dans les sédiments de lits des rivières. Le débordement de la berge à Podari se faisant au cours des plus importants épisodes de crue, ces quantités de charbon y déposées s'expliquent par le franchissement de tous ces barrages de la Jiu, à côté d'un apport supplémentaire pas de tout négligeable des versants (par l'activation des processus géomorphologiques) et des petites rivières affluentes aussi. La difficulté de repérer les possibles contributions en sédiments traîne encore dans l'analyse, car il est connu que pendant les crues, plusieurs sources de tout le bassin versant peuvent participer au transfert et l'apport de sédiments à l'aval. D'où l'importance de l'analyse sur la base des indices hydrologiques développée au chapitre §7.

**3.** Immédiatement en amont de la station hydrométrique de Rovinari, la rivière Tismana se jette dans la Jiu, apportant un débit disproportionnellement élevé (environ  $9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) par rapport à sa taille, à cause des aménagements hydroélectriques du système Valea Mare (Cerna – Motru – Tismana). Nous avons discuté les conséquences hydrologiques de la mise en place de ce système (chapitres §3.9 et §5.5), mais nous n'avons pas insisté sur les effets dans la dynamique sédimentaire. Nous avons prélevé des échantillons de sédiments des rivières du bassin Tismana aussi (de la rivière elle-même à Godinești et des affluents Orlea, Bistrița et Runcu), mais la granulométrie grossière de ces échantillons (§9.2.4) ne nous a

pas permis de continuer l'analyse avec la teneur en charbon. Nous pouvons toutefois remarquer qu'en aval de la confluence avec la Tismana, les alluvions de la rivière Jiu ne conservent pas une telle distribution granulométrique<sup>52</sup>, d'où une possible dis-connectivité entre ces deux rivières sur le plan hydro-sédimentaire.

4. Entre Rovinari et Podari, la rivière Jiu reçoit les eaux de ses affluents principaux, à la fois du point de vue hydrologique (les rivières Gilort – coté gauche et Motru – coté droit) et en ce qui concerne la participation de la zone de drainage du bassin minier Motru – Rovinari au transfert des sédiments (par l'intermédiaire de la rivière Jilt). Nous avons vu au chapitre §7.4 qu'en cas de crue, les rivières Motru et Gilort contribuent le plus en volume de l'eau, mais il reste à savoir si leurs systèmes hydro-sédimentaires sont tout aussi capables de fournir de la matière solide. Des pistes sur cet aspect ont été déjà ouvertes dans le chapitre §5.6, lorsqu'on a caractérisé les flux solides en utilisant les données de débit des alluvions en suspensions à quelques stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu, entre 2001 et 2010 (y compris deux stations sur chacune de ces deux rivières). Nous avons pu constater le gros volume des alluvions en suspension qui peut être enregistré, par exemple, à la station hydrométrique Turburea sur la rivière Gilort, environ 33 km en amont de la confluence avec la rivière Jiu. Lors de ces forts épisodes de crue (e.g. la crue de novembre 2007 quand la rivière Gilort a transporté plus de 4000 kg/s de sédiments en suspension), cet affluent a dû avoir une importante contribution en matière solide livrée à la rivière Jiu. De tels exemples peuvent être tirés aussi de l'analyse des débits des alluvions en suspension maximaux sur la rivière Motru (à la station hydrométrique Fața Motrului, la plus en aval).

5. Entre Filiași et Podari, conséquence aussi de la baisse de la pente générale du profil longitudinal de la rivière Jiu, nous supposons qu'une grande partie des alluvions provenant de l'amont se dépose avant d'arriver à l'endroit de la tranchée. En amont de la ville de Craiova, entre Răcari et Ișalnița, la rivière Jiu est à nouveau marquée des digues l'accompagnant presque tout au long de son parcours piémontan, sa plaine alluviale regagnant ainsi de largeur et renforcent de nouveau la connectivité latérale entre le lit mineur et celui majeur. Nous considérons ce secteur comme étant une des zones de stockage intermédiaire des sédiments et de remises en transfert vers l'aval lors des grandes crues. Ce secteur finit avec le réservoir d'Ișalnița, dans lequel les sédiments trouvent les bonnes conditions hydrauliques pour se déposer. Cela explique le taux élevé de matière charbonneuse trouvé dans l'échantillon de l'Ișalnița (2%) par rapport à celui de Podari (l'échantillon de lit, pas ceux de la tranchée), un peu plus en aval (0,09%).

6. A partir de Podari jusqu'à l'embouchure avec le Danube, la vallée de la Jiu devient assez large, avec des méandres et sinuosités spécifiques au secteur de plaine et ne reçoit aucune contribution importante de la part des petits affluents à écoulement temporaire. Le transfert de sédiments devient ainsi très lent et doit se faire en quantités inférieures qu'en amont de Podari, même si les mesures des alluvions en suspensions sur le Danube aval la confluence avec la rivière Jiu (à la station hydrométrique de Bechet) montrent une contribution encore forte de la part de la Jiu (atteignant 34% dans les années avec les plus grosses crues, selon une analyse de l'INHGA présentée lors du workshop du projet DanubeSediment, le mois d'août 2019). En tout état de cause, pour avoir une image complète de la variation spatiale dans le

---

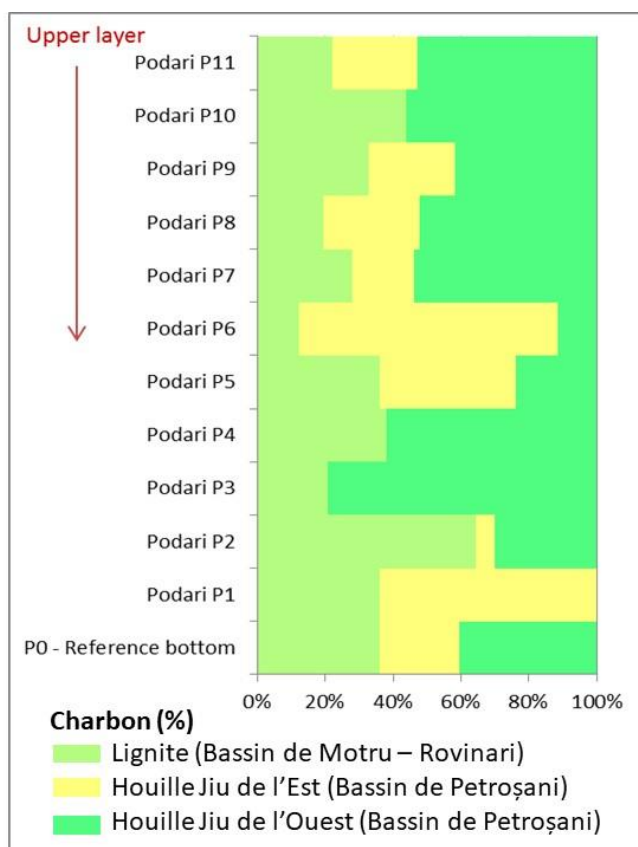
<sup>52</sup> Voir la distribution granulométrique de la rivière Jiu et de ses affluents dans le chapitre 10.2.4

système du bassin de la rivière Jiu, la quantité de charbon transférée en aval de Podari a été appréciée par nos analyses géochimique de 0,065% à s.h. Zăval (4 km de l’embouchure) et de 0,069% sur la rivière Jiet à Ostroveni (un ancien bras de la Jiu qui s’est formé son propre bassin versant il y a 100 – 150 ans, mais que continue à s’alimenter partiellement de la Jiu).

\*\*\*

La spéciation houille – lignite a été présentée aussi dans le chapitre §9.1, pour ce qui concerne les échantillons de la tranchée de Podari. On reprend les résultats ici seulement dans le but de relier ces résultats avec les possibles sources de l’amont. On se souvient du protocole de travail du chapitre §8.2.5.2., où nous avons expliqué que la séparation houille – lignite a été faite selon leur différence de densité (par flottation) et ensuite, le charbon du Bassin Petroșani (la houille du point de vue géochimique) a été attribué à la partie occidentale (les mines de la vallée de la Jiu de l’Ouest) ou orientale (les mines de la vallée de la Jiu de l’Est) en fonction de la teneur en matières volatiles (*Figure X.22*).

Nous observons que 4 sur 11 couches contiennent de la houille provenant exclusivement d’une des deux parties du bassin de Petroșani (L<sub>1</sub> – uniquement de la Jiu de l’Est et L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub>, L<sub>11</sub> – uniquement de la Jiu de l’Ouest). Cette information sera cruciale dans la mise en relation des résultats de spéciation du charbon avec ceux de la teneur en métaux lourds et lanthanides et avec l’analyse hydrologique sur la base des indices de crue. Les autres 7 échantillons de la tranchée contiennent de la houille de la Jiu de l’Ouest et de l’Est en proportions variables, dominée par la provenance (5/7) de la partie occidentale du bassin de Petroșani.



**Figure X.22.** Variation du contenu en charbon (%) pour chaque couche du dépôt alluvial de Podari (les couleurs des trois zones correspondent à la Figure X.19)

En ce qui concerne la relation entre la teneur en houille et lignite, d’un côté, et en houille de la Jiu de l’Est ou de l’Ouest, de l’autre côté, nous n’avons pas pu établir aucune liaison.



Une toute petite partie des échantillons des sédiments prélevés des lits des rivières a pu être soumise à la spéciation, à cause de la quantité minimale de charbon nécessaire (3g). Nous avons trouvé seulement un échantillon du bassin de Motru – Rovinari (celui prélevé en aval de la carrière de Timișeni), mais il n'a pas été besoin d'identifier l'espèce, il s'agissant du lignite. Sur la rivière Jiu, cinq échantillons ont présenté des quantités de charbon suffisantes pour permettre la spéciation. Il s'agit des échantillons de Podari, Ișalnița, Voinigesti, Sadu et amont Sadu, dans les gorges.

Sur ces échantillons dominés par la teneur en houille, la proportion de cette dernière entre la Jiu de l'Ouest et la Jiu de l'Est, à l'exception de celui de Podari, est en faveur de la provenance de la partie orientale (Jiu de l'Est). Nous pouvons expliquer ce fait en relation avec les résultats de l'analyse en teneur générale du charbon, présentée ci-dessus, qui a montré que, pendant les régimes hydrologiques moyen et des bas eaux (comme c'était pendant les jours de l'échantillonnage), plus de matière carbonneuse de la Jiu de l'Est est mobilisée. Ce n'est pas le cas non plus pendant les périodes des hautes eaux et surtout pendant les crues, quand la Jiu de l'Ouest peut transporter et livrer des quantités supérieures de charbon (et, par analogie, de sédiments), grâce à son débit plus grand et à la disponibilité à l'érosion du substrat sédimentaire tertiaire et des processus géomorphologiques plus nombreux de la partie occidentale de la Dépression de Petroșani.

#### *10.2.5.2. La teneur en minéraux lourds et en lanthanides*

La composition en minéraux lourds et lanthanides est le dernier pas dans la caractérisation des échantillons de sédiments prélevés. Comme mentionné au chapitre §8.2.6., l'occurrence dans les alluvions de ces éléments rares dans la terre peut être attribuée à une source ou l'autre d'un système fluvial, généralement liée aux formations géologiques et en secondaire aux activités d'extraction de certains minéraux (des métaux précieux, des métaux rares ou gisement radioactifs, parfois même du charbon). Par le biais de cette analyse, nous envisageons trouver des possibles sources de sédiments pour les couches alluviales déposées à Podari (des sources non pas considérées par d'autres méthodes, ou confirmer mes mêmes sources et les localiser plus précisément en fonction de la répartition spatiale de certaines lithologies).

Au total, 24 échantillons de sédiments de lit et les 11 échantillons de la tranchée à Podari ont été soumis à l'analyse de la teneur en minéraux lourds et en lanthanides. Des résultats sommaires en ce qui concerne le contenu total de minéraux lourds des échantillons de la tranchée ont été déjà reportés dans le chapitre §9.1. Cependant, vu le but de ce chapitre de confirmer la stratigraphie, nous ne sommes pas allés plus loin dans la présentation des résultats pour chaque élément concerné. Par contre, la distribution en lanthanides n'a pas été présentée avant.

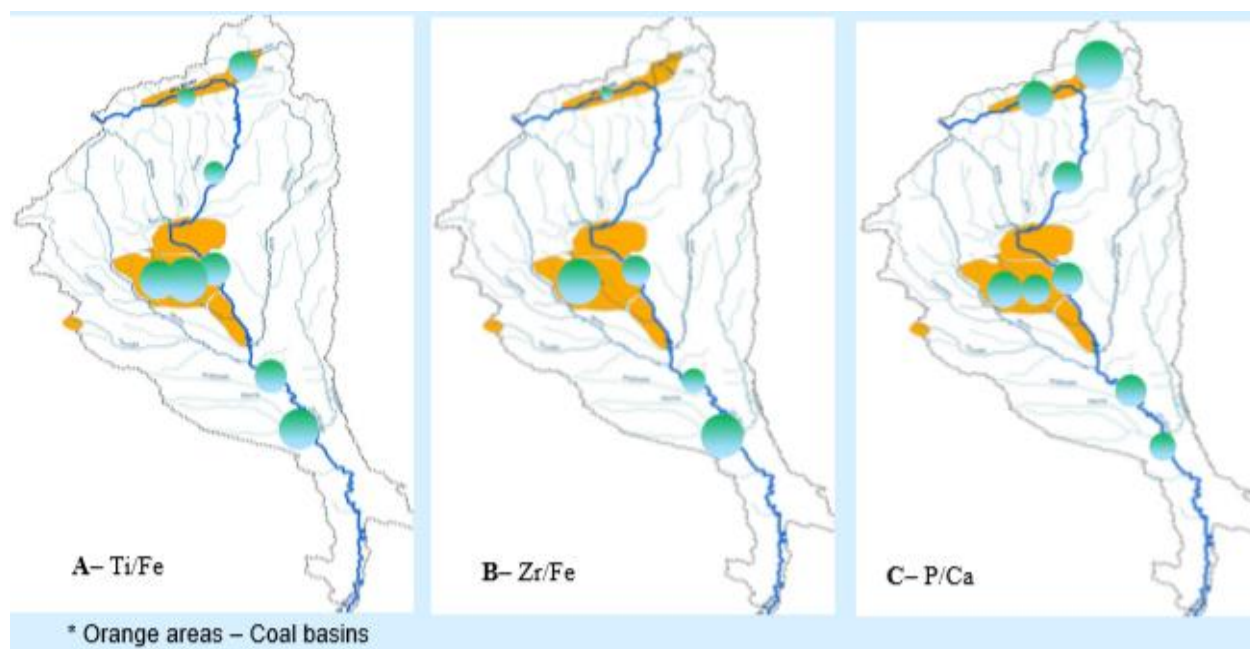
Parmi les 36 éléments rares issus de l'analyse XFR (dont la plupart sous forme des oxydes), moins d'un tiers sont en quantités importantes pour les considérer des traceurs géochimiques. On va voir dans ce qui suit lesquels. Il faut avant préciser que le protocole de traitement des résultats obtenus en laboratoire (la proportion de chacun de ces 36 éléments) demande qu'on fasse le rapport entre leurs proportions initiales (à la base de la fraction lourde seulement, de  $\rho > 2,83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) et la quantité totale de sédiments (y compris les fractions légères éliminées auparavant). Encore plus, la proportion d'un certain minéral lourd correspond en fait à son oxyde, d'où le besoin d'obtenir la proportion du minéral lui – même. Pour y arriver,

nous avons calculé des ratios entre différents oxydes, afin d'éliminer l'effet du groupe  $O_x$  de la proportion initialement calculée. Le choix des ratios à analyser a été fait sur la base d'un jugement expert du comportement géochimique des éléments uns par rapport aux autres et de la connaissance de l'occurrence de ces minéraux dans les formations géologiques du bassin de la rivière Jiu.

Comme attendu, les minéraux de silicium et calcium étant les plus répandus dans les roches, ont les plus grands pourcentages (>10% dans toutes les couches). L'aluminium suit de près les deux premiers minéraux, avec des proportions de son oxyde entre 10 - 15%, mais avec des absences sur deux couches ( $L_8$  et  $L_9$ ). Le groupe suivant est formé par les oxydes de fer, zirconium et titane, avec des pourcentages entre 1% et 10%. Ensuite, les oxydes de plutonium, potassium et magnésium occupent aussi des proportions au-dessus de l'unité (jusqu'à 5% pour le  $K_2O$ , plus abondant dans les roches métamorphiques et magmatiques). Enfin, parmi les autres minéraux lourds de proportions sous-unitaires, on remarque la présence dans certaines couches de l'or (qui ne peut provenir que des alluvions du lit de la rivière Jieț, l'affluent de la Jiu de l'Est) et de l'uranium (qu'on peut trouver soit naturellement dans des roches magmatiques, soit dans les dépôts des tas de stérile minier).

La dominance des mêmes minéraux lourds caractérise aussi les sédiments des lits des rivières en amont de la tranchée de Podari. La présence dans des proportions sous-unitaires d'autres éléments sera prise en compte, pour les uns, dans le calcul des ratios utilisés dans les représentations cartographiques et dans l'analyse finale de la relation zones sources – dépôt alluvial de Podari.

Dans les cartes de la **Figure X.23**, nous avons représentés les distributions spatiales des plus importants ratios ( $Zr/Si$ ,  $Cu/Fe$ ,  $Cu/S$ ,  $Ca/Mg$ ,  $P/K$ ) qui pourraient expliquer la provenance de certaines couches alluviales.

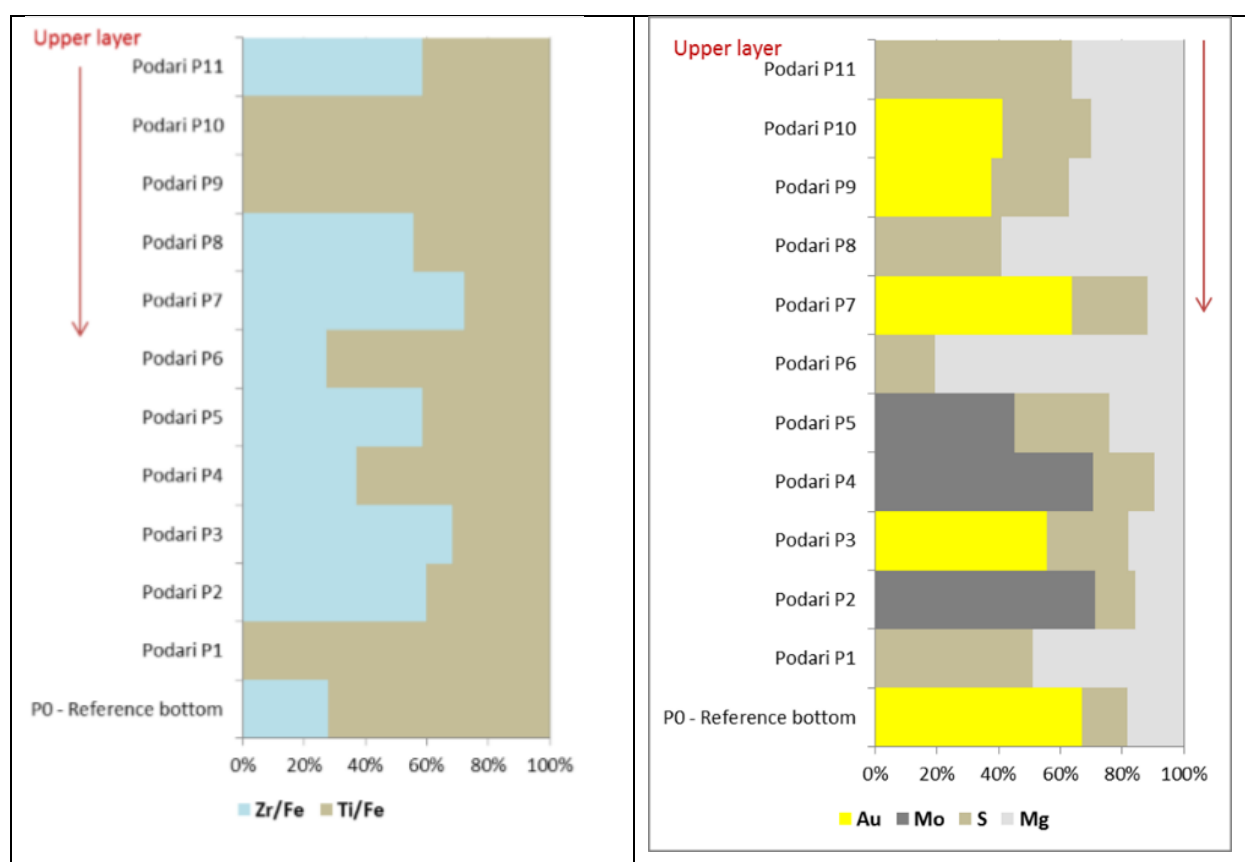


**Figure X.23.** Distributions spatiales des ratios  $Zr/Si$  (a),  $Ti/Fe$  (b),  $Ca/Mg$  (c),  $P/K$  (d) (les dimensions des cercles sont proportionnelles avec les teneurs en métaux lourds)

La distribution spatiale de ces ratios a été mise en relation avec les caractéristiques lithologiques du bassin de la rivière Jiu. Pour illustrer ce point par un exemple, la distribution du titane a mis en évidence des sources de sédiments riches en ilménite, le rapport  $Ti/Fe$  étant nettement plus élevé pour les sédiments

collectés des rivières Motru et Jilț et provenant de bassins miniers de lignite. La même origine, des sédiments du bassin de la Jilț, explique aussi la distribution du Zr/Si dans les échantillons en aval. Le ratio Ca/Mg domine les sédiments qui pourraient avoir leurs sources dans la zone karstique, mais il est aussi caractéristique au bassin de la rivière Jilț. Enfin, le rapport P/K semble être indicatif pour le bassin de la Jiu de l'Est et moins pour ce qui se forme en aval des montagnes. En ce qui concerne les oxydes d'or et d'uranium (**Figure X.23**), leur distribution est tout à fait intéressante.

Ainsi, l'or a été trouvé (dans des proportions très petites <0,001%) non seulement dans les sédiments de la Jiu de l'Est (comme attendu), mais aussi dans uns des échantillons des bassins des rivières Jilț, Gilort et Amaradia. Cependant, la traçabilité de l'or est très difficilement à établir, étant donnée la proportion très basse. Pour l'uranium, la distribution semble être un peu plus facilement à repérer, étant donnée sa présence exclusivement dans les échantillons de l'affluent Mierlosu (probablement provenant du tas de stérile minier) et de la Jiu, dans quelques points à partir de Sadu jusqu'à Zăval.



**Figure X.23.** Les cartes des distributions des ratios Zr/Fe et Ti/Fe (a) et de l'or et de l'uranium (b) dans les sédiments du bassin de la rivière Jiu (le total de 100% représente la teneur sommée des ratios/ métaux lourds du chaque graphique)

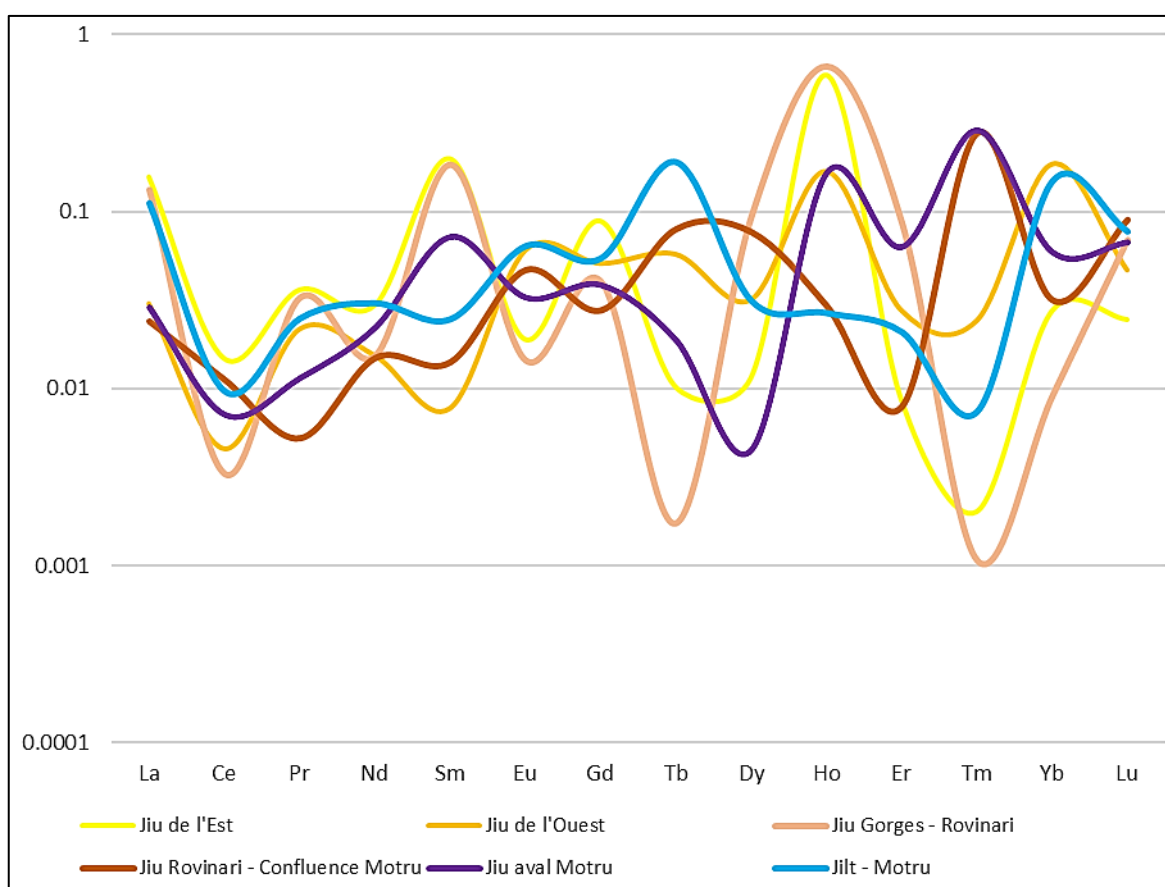
Les proportions des autres minéraux lourds, qui n'ont pas été représentées sur les cartes et commentées dans le chapitre ont été quand même considérées dans l'analyse finale d'attribution des possibles sources de sédiments aux 11 couches alluviales de Podari.

\*\*\*

La méthodologie d'analyse des lanthanides a été un peu différente de celle des métaux lourds. Les proportions initiales de chacune des 14 terres rares (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) ont été normalisées avec la proportion connue de chondrites (pour plus de détails leur provenance, voir

§8.2.6). La relation entre la distribution des lanthanides des sédiments des zones sources amont (les échantillons des lits des rivières) et celle des échantillons des couches du dépôt alluvial en aval (à Podari) peut être visualisée le graphique de la distribution normalisée des lanthanides (**Figure X.24**).

Nous avons essayé de grouper les échantillons des zones sources amont selon les caractéristiques géologiques et hydrologiques communes en 6 catégories, chacune avec sa propre couleur sur les graphiques : a) la région source de la Jiu de l'Est (en jaune) ; b) Jiu de l'Ouest (en orange) ; c) le secteur des gorges – Rovinari (en vert) ; d) la vallée de la Jiu entre Rovinari et la confluence avec la Motru, qui inclut aussi les deux échantillons prélevés sur les affluents Gilort et Amaradia, des bassins versant avec les mêmes caractéristiques que ce secteur de la rivière Jiu, du point de vue de l'occurrence des lanthanides (en brun) ; e) la vallée de la Jiu aval de la confluence avec la Motru (bleu foncé – violet) et f) les sous – bassins Jił – Motru (en bleu). Sur chacun des 11 petites graphiques, la courbe interrompue en noir correspond à une des 11 couches de la tranchée à Podari.

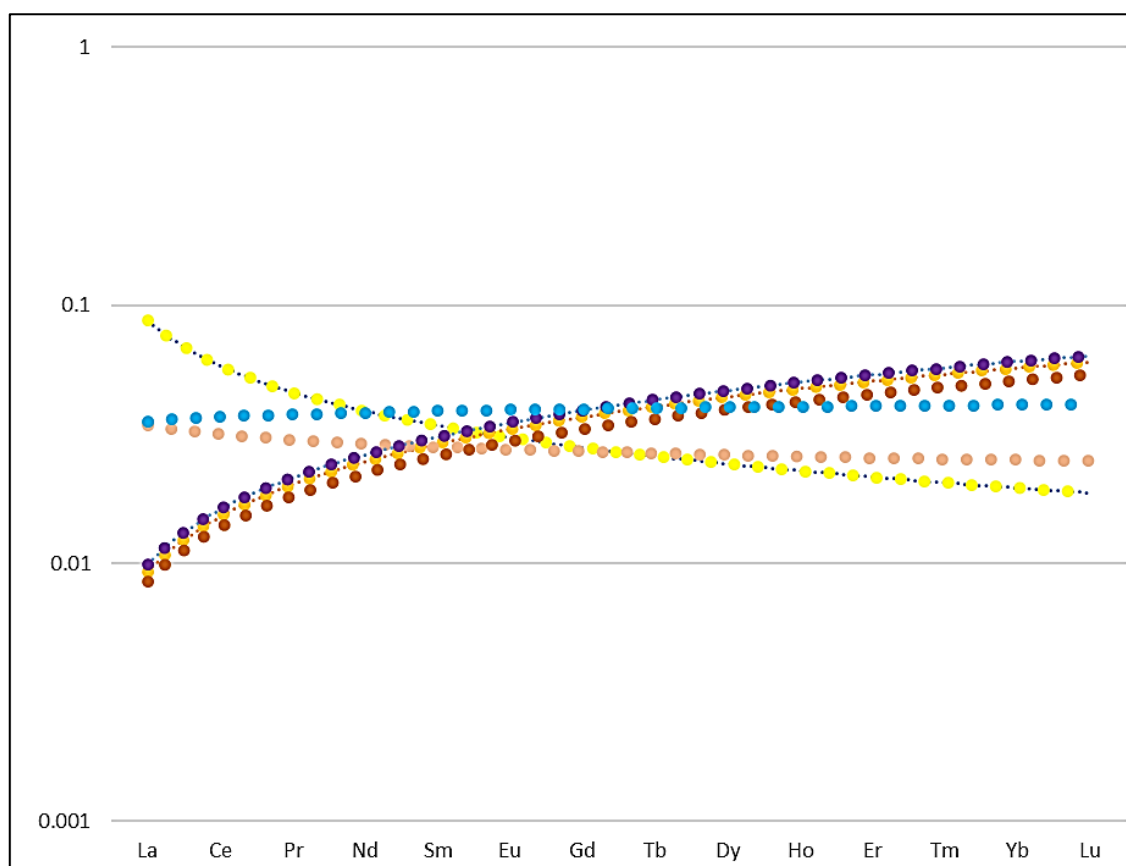


**Figure X.24.** La distribution normalisée des lanthanides de la moyenne de chaque lanthanide des échantillons inclus dans les 6 zones sources (sans unité de mesure, rapportées à l'ensemble des lanthanides contenues dans chaque groupe d'échantillons)

L'interprétation de la distribution des lanthanides se fait en deux étapes en s'appuyant sur les proportions des 14 éléments ensemble. Leur parcours successif est en effet une attribution des possibles sources des sédiments d'une perspective générale (au niveau des 6 zones sources) à une échelle spatiale plus fine (les échantillons de chaque rivière analysée). Suivant cette logique, **la première étape** consiste dans la reconnaissance à une échelle spatiale plus grossière des 6 zones source des lanthanides, en utilisant les graphiques de la distribution et des tendances de ces distributions. La lecture des deux types de

graphiques est la suivante : *a*) en saisissant sur les graphiques la concordance entre les pics de certains lanthanides d'une ou de plusieurs des 6 zones sources et les pics des échantillons de chaque couche alluviale de Podari et *b*) en choisissant la ou les lignes de fonction les plus proches (comme allure, pas nécessairement comme valeurs) des courbes de tendances des 14 lanthanides mesurées à chaque couche alluviale de Podari (pour le graphique de la **Figure X.25**).

Sur la base de la distribution des différents métaux lourds et de l'allure des lignes de tendance des lanthanides, nous avons comparé les résultats à Podari pour les 11 couches avec les caractéristiques des échantillons des zones sources potentielles. Ensuite, nous avons corrélié tous les résultats des analyses de laboratoire (contenu en charbon et sa spéciation, métaux lourds et lanthanides, pétrologie organique) avec les conclusions du chapitre §7 sur l'apport des sous-bassins selon les indices de crue et nous avons proposé deux possibles scénarios de crues ayant déposé les dernières trois couches à Podari et leur possibles sources.



**Figure X.25.** Les courbes de tendances des 14 lanthanides des échantillons inclus dans les 6 zones sources (sans unité de mesure, rapportées à l'ensemble des lanthanides contenues dans chaque groupe d'échantillons)

### 10.3. La synthèse des possibles caractéristiques des zones sources de sédiments déposées à la tranchée alluviale de Podari

Le travail d'élimination des crues ne correspondant pas aux critères topographiques et hydrologiques (§9.1.), l'analyse détaillée des caractéristiques colorimétriques, pétrologiques et géochimiques des échantillons de l'amont (§9.2.) et l'implémentation des indices des crues des sous-bassins affluents de la rivière Jiu (§7) nous ont conduit à une synthèse complexe des possibles sources de sédiments et des zones de formation des crues.

La stratégie d'attribution des sources de sédiments à une couche alluviale a la logique suivante :



- *premièrement*, nous avons sélectionné les crues les plus probables à avoir débordé et créé chaque couches (avec une incertitude qui augmente du haut en bas de la tranchée en raison de la baisse du niveau sur la berge à atteindre et du vieillissement des dépôts dont les premières « x » couches, L<sub>1</sub> – L<sub>x</sub>, peuvent avoir été construit avant les années d'analyse 2001 – 2014). Dans cette étape on s'appuie sur les scénarios de la Figure X.8 de §10.1, dans lesquels nous avons attribué à chaque couche les crues possibles à avoir déposé les sédiments, à la fois du point de vue chronologique (en éliminant les crues plus récentes si on était sûr d'avoir trouvé la bonne correspondance entre la couche en-dessus et une certaine crue) et hydrologiquement (en utilisant le critère de la relation niveau / altitude à atteindre sur la berge – débit maximal de la crue capable de la faire déborder).

- *deuxièmement*, nous avons décrit les couches de la tranchée en termes de composition géochimique et pétrologique et d'autres propriétés qui pourraient être utiles pour les individualiser l'une de l'une autre. Nous nous attendons probablement à retrouver ces caractéristiques lors de la recherche des sous-bassins les plus contributifs lors des crues retenues dans la première étape. En d'autres termes, une crue supposée avoir déposé la couche alluviale devrait provenir de parties du bassin hydrographique reliées à ces sources estimées avec les analyses de laboratoire.

- *troisièmement*, nous avons vérifié chronologiquement chaque épisode de crue, de la plus récente à la plus ancienne, en termes de bassins versants contributifs. Pour y arriver, nous nous sommes servis des indices de crue.

- *enfin*, pour les crues correspondant hydrologiquement à la couche étudiée (relation niveau - débit - altitude de dépôt), nous avons vérifié si les éventuels sous-bassins versants contributifs signalés par les indices de crue présentent les caractéristiques géochimiques, pétrographiques, colorimétriques requises par la composition et l'aspect de la couche en cause. Au cas où plus d'épisodes de crue correspondent aux critères, il y aura une discussion sur laquelle choisir à la fin et un certain degré d'incertitude sera supposé.

Nous nous sommes arrêtés à deux scénarios, qui sont présentés en termes de caractéristiques attendues, de propriétés des sources de sédiments possibles et de correspondance finale entre les couches de sédiments - le moment du dépôt (épisode de crues).

Dans le **Tableau X.20** nous présentons les versions de ces possibles sources, car parfois plusieurs crues ont pu être associées à la même couche déposée à l'aval.

**Tableau X.20.** Sources de sédiments possibles en relation avec les dépôts à la tranchée de Podari

<b>couche</b>	<b>Epaisseur</b>	<b>COT</b>	<b>Houille</b>	<b>Lignite</b>	<b>Métaux lourds</b>	<b>Couleur et indices colorimétriques</b>	<b>Remarques particulières</b>
1.	moyenne à grande, à peu près égale aux deux tranchées	faible	faible	la plus faible	la plus faible	Gris – marron (appartenance plutôt à la gamme rouge)	Aucun autre signe distinctif
2.	Grande, différences entre les deux tranchées	la plus faible	la plus faible	faible	Faible à moyenne	Gris plus foncé que le précédent	Aucun autre signe distinctif
3.	moyenne à grande à peu près égale aux deux tranchées	la plus faible	Grande quantité	faible	faible	Gris – marron (appartenance plutôt à la gamme rouge)	Aucun autre signe distinctif
4.	Moyenne à grande à peu près égale aux deux tranchées	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Gris – marron (appartenance plutôt à la gamme rouge)	Aucun autre signe distinctif

5.	Moyenne à grande pour T <sub>amont</sub> et la plus grande pour T <sub>aval</sub>	Faible	Grande	La plus grande	Moyenne à grande	Pareil à P <sub>3</sub>	Aucun autre signe distinctif
6.	Faible à moyenne pour T <sub>amont</sub> et grande pour T <sub>aval</sub>	Faible	Grande	Faible	Moyenne	Gris de gamme rouge et jaune assez bas - obscure	Une couche plus obscure possiblement grâce à la houille
7.	Moyenne, à peu près égale aux deux tranchées	Faible à moyenne	Moyenne à grande	Faible	Faible à moyenne	Gris de gamme rouge et jaune assez haute – assez claire	Aucun autre signe distinctif
8.	Moyenne pour T <sub>amont</sub> , grande pour T <sub>aval</sub>	Moyenne	La plus grande	Faible à moyenne	Moyenne à grande	Gris de gamme jaune assez haute. Luminosité élevée,	Même si grande quantité de charbon, la couche semble claire, grâce à la couleur jaune prédominante
9.	Moyenne à grande, plus épaisse en aval	Faible	Faible	Faible	Faible à moyenne	Pareil à P <sub>3</sub> et P <sub>5</sub>	Aucun autre signe distinctif
10.	Faible, même épaisseur aux deux tranchées	La plus grande	Faible	Faible	Faible à moyenne	Gris obscurs, pas beaucoup développé vers le jaune	Très grande quantité de COT, mais pas nécessairement de charbon
11.	La plus grande, même épaisseur aux deux tranchées	Grande	Faible	Faible	Faible à moyenne	Gris obscurs, pas beaucoup développé vers le jaune	Très grosse couche – une crue généralisée, de haut débit de pointe, mais pas nécessairement dominée par les contributions des zones d'exploitation du charbon

En fonction du niveau à atteindre sur la dernière couche déposée à Podari, nous avons évalué les différentes couches en termes de capacité à avoir débordé et éventuellement déposer des sédiments (**Tableau X.21**). Pour chaque couche, nous avons marqué en rouge la crue à partir de laquelle la relation débit maximal de la crue – niveau atteint au droit de la tranchée n'est plus sûre. Dans les colonnes des couches avec la même crue notée en rouge, le niveau de sureté des crues possibles à avoir déborder est haut et probablement d'autres crues antérieures sont aussi susceptibles d'avoir déposé la couche que celle marquée.

**Tableau X.21.** Les crues potentielles à avoir atteint les niveaux nécessaires au droit de la tranchée (P<sub>11</sub> la couche la plus récente et P<sub>0</sub> la couche basale), afin de déposer la couche suivante (les numéros sont de 1 à 27, selon la chronologie des crues, de la plus récente, décembre 2014 à la plus ancienne, décembre 2002)

P11	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
			2	2	2	2	2	2	2	2	2
			3	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
			5	5	5	5	5	5	5	5	5

			6	6	6	6	6	6	6	6	6
		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
			8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
				13	13	13	13	13	13	13	13
	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Nous observons que le niveau de certitude diminue en profondeur. Si pour les premiers 2-4 couches les plus récentes d'en haut, nous pouvons associer une crue possible parmi les 27 les plus fortes des années 2000, au-delà du niveau de la quatrième couche la plus récente, la relation niveau – débit est trop compliqué à vérifier sans des courbes de tarages. Le plus probablement, les autres couches plus anciennes ont été déposées avant les années 2000. En fonction des crues gardées. Ainsi, nous avons proposé deux possibles scénarios de crues ayant déposé les premières 4-5 couches les plus récentes au maximum. Plus bas, il serait hasardeux, voir imprécis à estimer.

La *première hypothèse* suggère que seulement les crues les plus fortes d'une année auraient pu déposer des sédiments, ce qui nous conduit à associer les premières 3 couches aux dernières 3 années de l'analyse (*Tableau X.22*). Valable pour les scénarios suivants également, il y a une correspondance multiple entre les dernières 6 couches en bas et les possibles crues qui les ont formées, ce qui rend l'attribution de sources des sédiments impossible à ce stade. On s'est contenté à réfléchir sur les possibles sources des sédiments pour les 5 premières couches uniquement.

**Tableau X.22.** Scénario 1 de la relation amont – aval des sédiments déposés par les crues à Podari

Couches	Caractéristique couche. Qu'est-ce qu'on cherche à trouver?	No. crue	Caractéristique crue selon les indices de crue	Critique
P11	Rien distinctif du point de vue géochimique, à part le Pt. Il vient des roches plutoniques. La crue qui l'a déposé devrait provenir surtout de l'amont. Un peu d'or aussi, donc la crue peut avoir été formée dans le bassin de la Jiu de l'Est ou de la Jilt. Si provenance de la Jilt, alors le contenu en lignite doit être un peu plus grand, ce qui contredit un peu le contenu assez faible trouvé à l'analyse géochimique	1	Une quantité moyenne à inférieure de charbon, donc les bassins d'extraction du charbon sont peut-être moins impliqués dans la livraison des sédiments. Une crue de l'aval. Ne peut pas amener du charbon. Peut-être seulement celui remise en suspension du secteur amont, mais pas distinctif. On doit chercher des traces quand même. C'était la seconde crue comme débit	Ça marche du point de vue hydrologique, mais pas du point de vue de la composition en charbon et métaux lourds

P10	De nouveau, une teneur faible en charbon. Assez riche en Ti/Fe et en Pt. Ca peut provenir en même temps du sédimentaire de la zone Motru - Jilt et des roches plutoniques	9	Une crue du N2 et du N3. De la houille peut-être on peut trouver, mais pas beaucoup. —C'était la plus forte crue. On doit chercher quelque chose distinctif	On ne distingue pas la Jilt du point de vue hydrologique
P9	Pas beaucoup de charbon. Une teneur moyenne de Zr/Fe et Ti/Fe (le sédimentaire de la Jilt ou même de la Jiu de l'Ouest)	10	Une crue de partout. On s'attend à plus d'houille et à un peu moins de lignite	
P8	Grande quantité de houille, mais le lignite et non plus négligeable	12	La Motru participe, la Jiłt aussi et on voit un peu de contribution de la Jiu de montagne aussi. On peut s'attendre à une quantité presque égale de lignite et houille. —Quand même, une crue pas très forte	Ça peut être une solution, sauf que ça n'explique pas la quantité élevée de houille
P7	Une grosse quantité de Ca/Mg, les secteurs karstiques peut-être. Une quantité de houille pas négligeable, mais pas beaucoup de lignite	14	Motru et les rivières du niveau N2 dans l'analyse des indices de crue. Pas de charbon	Cette crue explique la composition géochimique partiellement. La Motru et les autres rivières de N2 peuvent amener des réponses sur le contenu haut en Ca (des bassins versant karstiques), mais pas sur la teneur en houille

Le *deuxième scénario* (Tableau X.22) admet que pendant une année, plusieurs crues ont peut-être débordé et déposé des sédiments, ce qui rend au moins les plus hautes couches un peu plus jeunes.

**Tableau X.22.** Scénario 2 de la relation amont – aval des sédiments déposés par les crues à Podari

Couches	No. crue	Caractéristique crue selon les indices de crue	Critique
P11	1	Idem Tableau X.21	Idem Tableau X.21
P10	4	Provenance probable de la Jiłt (peut-être un peu de lignite) —Un peu de partout du secteur montagne (on s'attend à la houille aussi, mais pas beaucoup)	On a trouvé la Jilt pour le Ti/Fe et le secteur montagne pour le Pt (roches plutoniques)
P9	7	Tous les trois secteurs, surtout les petits affluents de N1 et N2. Un peu moins la Jiu de l'Ouest—Le charbon est plutôt de type houille inférieure	C'est en accord avec l'analyse pétrographique. La présence de la houille inférieure et la Jiu de l'Est
P8	9	Une crue du N2 et du N3. De la houille peut-être on peut trouver, mais pas beaucoup. —C'était la plus forte crue. On doit chercher quelque chose distinctif	La présence de la houille partiellement expliquée
P7	10	Une crue de partout. On s'attend à plus d'houille et à un peu moins de lignite	Ça explique bien la quantité de houille, mais on n'a pas de pistes sur la provenance du Ca/Mg

Les résultats présentés sont malgré tout susceptibles d'être subjectifs et dans la plupart orientatifs, n'ayant pas la prétention de montrer la correspondance parfaite entre les sédiments d'une couche, la crue réelle qui l'a déposée et les sous-bassins ou les zones sources de formation exactes de cette crue en ce qui concerne la matière en suspension transportée. Nous apprécions cette démarche comme un exercice qui se veut le plus possible proche de la réalité, même si des limites liées aux méthodes utilisées, aux moyens d'exploration et endroits d'échantillonnage sur le terrain subsistent.

#### 10.4. Retour sur les hypothèses initiales (§6.3.)

Les hypothèses qui nous ont guidé tout au long de la démarche d'analyse de la stratigraphie et de la relation entre les couches sédimentaires et les crues susceptibles de les déposer ont prouvé leur importance dans les différentes phases du raisonnement. On reprend chaque hypothèse lancée au chapitre §6.3 en commentant la façon de sa mise en place.

**H1 : Chaque couche alluviale a été déposée lors d'un seul événement d'inondation.** Nous n'avons pas cessé de nous servir de cette hypothèse tout au long de la démarche des chapitres 7 – 10. Cela est le fondement du raisonnement qu'on a émis dès le début. Les crues que nous avons gardées lors de l'analyse d'élimination au chapitre §10.1 sont soupçonnées avoir déposé les 11 couches sédimentaires de la tranchée T<sub>aval</sub>, en dépit de la proximité en temps de quelques-unes (comme par exemple les crues d'avril – mai de 2014 qui auraient pu être considérées comme un seul événement). Il se peut toutefois, que cette hypothèse ne soit pas tellement solide pour les couches plus épaisses, que nous avons considérées compactes, tandis qu'en réalité elles auraient pu être déposées par des crues successives de la même année.

**H2 : Les processus d'érosion et de lavage affectant la couche alluviale supérieure, ont été suffisamment réduits pour ne pas être pris en compte.** Nous n'avons pas étudié en détail les processus d'érosion et dépôt et les conditions hydro-morphologiques au droit de la tranchée, mais l'analyse des cartes aériennes de différentes années nous montre une rive droite assez stable, dont les seuls changements semblent être ceux d'aggradation lors d'une crue. De plus, nous n'avons pas disposé d'autres moyens pour démontrer cette hypothèse, donc nous la prenons comme vraie, faute de preuves contraires de possibles phases d'érosion de la berge.

**H3 : La berge accumulative formée par les crues débordantes est relativement récente (moins de 50 ans) et stable.** L'âge récent est une notion relative. On s'attendait que toute la succession des 11 couches soit plus jeune d'un demi-siècle, étant donnée la construction de la digue derrière la berge dans les années '70. Quand même, nous n'avons pas pensé au début que le niveau général de la rivière dans les années '70 pourrait avoir été plus haut qu'au présent et qu'une ou plusieurs couches basales qu'on a vu exondées à l'heure actuelle auraient pu se trouver déjà sur place submergées dans les années '70. On a démontré dans le chapitre §9.2 que la couche datée, de la base de la tranchée, est assez récente (une autre relativisation de ce terme selon le vocabulaire dans le domaine de la datation), son âge ayant été estimé par la technique OSL à environ 100 ans.



Ce résultat ne doit pas être décourageant, en raison de deux limites des hypothèses qu'on n'a pas pu franchir :

a) OSL donne des âges très approximatifs pour les dépôts plus récents de 100 ans. Notre résultat se trouve, donc, à la limite de détectabilité et la tranchée peut être vraiment aussi récente que soupçonné au début. D'ailleurs, nous avons plusieurs raisons de considérer que la couche basse n'a pas plus d'un siècle (les traces de charbon qui doivent être mises en relation avec le début de l'industrie minière, dans la première moitié du XXe siècle, pas avant) et que seulement en raison de la relativité de la datation par cette technique, nous avons obtenu un âge plus grand, de 100 – 125 ans.

b) Le moment d'échantillonnage en vue de la datation par OSL a été en septembre 2018, quand le niveau de la rivière était encore plus bas qu'en juin 2017 lorsque nous avons creusé la tranchée. Pour ne pas exposer les sédiments récoltés à la lumière, nous avons échantillonné dans la partie inférieure de la tranchée, au niveau de la couche P<sub>0</sub> et un peu en-dessous. Par conséquent, les couches qui portent l'intérêt de notre étude, P<sub>1</sub>-P<sub>11</sub>, se trouvent toutes au-dessus de la couche datée, d'où forcément un âge inférieur à 100 ans, même avec la marge d'incertitude de la techniques OSL.

\*\*\*

Pour conclure, les trois hypothèses fortes qu'on a formulées au début de cette analyse restent debout, avec parfois des manques de concordances tout à fait explicables avec les résultats obtenus. Cependant, étant conscients de l'âge plus grande des premières couches (possiblement déposés avant la période de mesures hydrologiques aux stations du bassin de la rivière Jiu), nous ne pouvons pas attribuer à toutes les couches des épisodes de crues potentiellement capables d'avoir déborder et déposer des sédiments. On retient cela comme limite de l'analyse et comme incongruence entre les moyens méthodologiques offerts par les données hydrologiques et les échantillons à analyser dont on a disposé pour ce travail de thèse.

## Synthèse du chapitre

A travers les analyses de colorimétrie, pétrologie organique, spéciation houille – lignite, métaux lourds et lanthanides, nous avons essayé de relier les possibles sources d'alluvions des différents sous-bassins versant avec les caractéristiques des couches alluviales de la tranchée de Podari.

Nous avons mis ensemble les résultats des indices de crue (§7) avec les résultats adéquats des différentes analyses des échantillons prélevés et nous avons réussi à sélectionner un nombre de crues possibles en termes du niveau et volume d'eau à atteindre et transporter, afin de pouvoir déposer les couches analysées sur le profil vertical alluvial à Podari. Nous nous sommes arrêtés finalement à deux scénarios en ce qui concerne la relation sources des alluvions en suspension - événements de crue et caractéristiques géochimiques, pétrologique et physiques des couches alluviaux, scénarios dans lesquels nous avons priorisé les premières 5 couches supérieurs les plus récentes. Le niveau d'incertitude est

d'autant plus grand qu'on descend vers les couches inférieures, probablement plus anciennes des années 2000 et qu'on étudie des crues des premières années après 2000, sans des courbes de tarage fiables.

L'exercice, bien que loin d'être achevé (les deux scénarios ne sont que deux exemples possibles), nous a montré comment mettre en corrélation les informations provenant de différents types d'analyses et pour déterminer les événements extrêmes et les sources de la dynamique des hydro-sédimentaire d'un bassin versant.

# Chapitre 11

## Conclusions finales

<b>11.1. Synthèse des résultats et réponse aux questions de la recherche</b> .....	529
<b>11.2. Conclusions générales sur la démarche méthodologique</b> .....	521
11.2.1. Retour d'expérience sur la démarche méthodologique : points forts et limites.....	531
11.2.2. Réplication de l'étude et recommandations.....	533
<b>11.3. Limites de l'approche et perspectives</b> .....	535
11.3.1. Analyses hydrologiques à des échelles spatiales et temporelles plus fines.....	535
11.3.2. Une image holistique des processus géomorphologiques.....	535
11.3.3. Amélioration des techniques de laboratoire.....	536
11.3.4. Indices de crue – intégration des sous-bassins d'ordre supérieur et automatisation du calcul.....	536
11.3.5. Techniques de datation - obligatoires pour connaître l'âge des dépôts alluviaux.....	536
11.3.6. Approches méthodologiques pour répondre aux questions sur les échelles spatio-temporelles de la dynamique hydro-sédimentaire.....	536

## ***11.1. Synthèse des résultats et réponse aux questions de la recherche***

L'objectif général de cette thèse a été d'analyser les flux hydro-sédimentaires dans le bassin de la rivière Jiu à différentes échelles spatiales et temporelles. Pour répondre à cet objectif, la recherche s'est articulée autour de deux questions clés, que nous rappelons ci-dessous :

***1. Quels sont les facteurs naturels et anthropiques contribuant à la production et au transfert des flux de matière liquide et solide au niveau du bassin de la rivière Jiu et quel est leur rôle dans la dynamique hydro-sédimentaire ?***

***2. Quelle est l'importance des échelles spatiales et temporelles dans l'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire en ce qui concerne les sources de sédiments, les événements hydrologiques extrêmes, les voies de transfert et les zones favorables à l'accumulation des sédiments ?***

Dès le début, nous avons souligné la complexité des facteurs naturels et anthropiques contrôlant les flux hydro-sédimentaires spécifiques au bassin versant de la rivière Jiu, qui est devenu après les années 2000 un sujet de recherche d'intérêt non seulement pour les universitaires mais également pour les acteurs gestionnaires des ressources en eau. A cause de sa complexité, il était évident qu'un projet de thèse, comme celui-ci, n'aurait pas pu tout couvrir en termes de la dynamique hydro-sédimentaire, de facteurs responsables et d'échelles spatio-temporelles. Il fallait trouver un chemin d'étude plus particulier. Depuis le premier voyage sur le terrain, nous avons remarqué combien de particules de charbon étaient présentes dans les dépôts alluviaux de la rivière Jiu et à quel point leur lien avec les particules inorganiques des sédiments fins était étroit. Sur la base de ces observations, le principal raisonnement était clair : suivre l'origine de ces particules dans les sédiments et essayer de comprendre la dynamique hydro-sédimentaire en utilisant le charbon comme traceur. Une question méthodologique préalable se préfigurait, donc, petit à petit et elle est devenue un défi : „*Est-ce que les héritages sédimentaires dans le lit représentent un outil suffisant pour comprendre le transfert des flux de matière dans le bassin versant et le rôle des crues dans la morphologie fluviale ?*”. À notre connaissance, il n'y avait aucune autre étude sur d'autres bassins hydrographiques dans le monde combinant des champs de recherche autour du charbon avec l'hydrologie et la géographie.

La thèse a été structurée en deux parties principales, suivant le raisonnement du général au particulier. Les méthodes employées ont suivi de près la même approche, devenant de plus en plus précises et auto-génératives, chapitre par chapitre. La première partie porte sur la dynamique hydro-sédimentaire du système du bassin versant de la rivière Jiu. Elle englobe des analyses à l'échelle globale, du bassin versant entier, en mettant en évidence les particularités des facteurs géographiques (naturels et anthropiques) influençant la dynamique hydro-sédimentaire, ainsi que des caractéristiques hydrologiques générales. La

seconde partie est plus analytique et utilise à la fois des bases de données géographiques et hydrologiques, ainsi que de différentes techniques de laboratoire d'analyse d'échantillons de sédiments et du charbon.

*Le premier chapitre* présente les questions et objectifs de recherche, ainsi que les ressorts motivationnels du choix du sujet. Ensuite, *le deuxième chapitre*, en cherchant à répondre théoriquement aux principales questions de la thèse, montre comment la dynamique hydro-sédimentaire est reflétée dans la littérature, quels sont les principales méthodes, concepts et types de données utilisés pour traiter de tels sujets. Nous avons présenté les systèmes fluviaux et hydro-sédimentaires et les théories guidant la recherche en adoptant l'approche systémique, et illustrant autant que possible les schémas et le champ notionnel à l'aide d'exemples tirés du bassin de la rivière Jiu.

Dans *le troisième chapitre*, le bassin de la rivière Jiu a été caractérisé en termes des conditions géologiques, morphologiques, climatiques, hydrographiques, de couverture/ utilisation du sol et d'activités anthropiques influençant la dynamique hydro-sédimentaire.

*Le quatrième chapitre* couvre un large éventail de questions portant sur les méthodes SIG les plus pertinentes à utiliser pour analyser les facteurs géographiques contrôlant la dynamique hydro-sédimentaire. Des méthodes déjà existantes et d'autres nouvelles ont été mises en place ou adaptées aux données dont nous disposons. En premier lieu, une nouvelle méthode a été développée pour quantifier le rôle des caractéristiques géographiques des bassins hydrographiques (en amont des points de mesure), capables d'expliquer la variation spatiale de la teneur totale de la matière dissoute (TTMD). Nous avons ensuite investigué le potentiel géomorphologique de formation et de dépôt de sédiments, en cartographiant les processus et les formes d'accumulations de versant et de lits de rivières, tels que les glissements de terrain, les ravins, l'érosion en nappe et en rigoles, les coulées et les barres de sable. L'attention a été portée sur les zones sensibles de relief, sensibles à l'action érosive de la pluie et susceptibles de devenir des sources de sédiments : processus géomorphologiques à proximité des carrières de charbon à ciel ouvert, des gravières, des tas de stérile résultant de l'exploitation du charbon. Dans une étape ultérieure, l'indice de connectivité conçu par Cavalli *et al.* (2016) a été calculée pour chercher le degré de connexion entre les zones sources de sédiments et les rivières. La production de sédiments a également été analysée globalement en utilisant la méthode USLE adaptée à l'ensemble du bassin de la rivière Jiu.

*Le cinquième chapitre* (le dernier de la première partie) a été consacré à la variabilité hydrologique en explorant les bases de données sur les débits fournies par l'Administration Nationale des Eaux Roumaines et l'Institut National d'Hydrologie et de Gestion des Eaux. Différentes méthodes statistiques ont été utilisées pour caractériser la variabilité temporelle, y compris pour vérifier leur qualité et leur stationnarité. Au total, 75 stations hydrométriques ont été valorisées dans l'analyse hydrologique.



La seconde partie de la thèse porte sur des questions plus spécifiques liées aux types et quantités de sédiments atteignant les rivières, aux échelles de temps impliquées et aux possibilités pratiques d'analyser la dynamique hydro-sédimentaire en valorisant la présence du charbon dans les dépôts sédimentaires, comme des témoins des sédiments en suspension dans un bassin hydrographique.

Dans le *sixième chapitre*, nous avons discuté des modes de transport de sédiments à analyser : par charriage ou en suspension. Les sédiments qui se déplacent sur le fond des lits nécessitent des mesures et des modèles mathématiques sur lesquels nous n'avons pas pu fournir d'expertise. Parce que les données sur les sédiments charriés sont rares, nous avons décidé de concentrer nos efforts à l'étude uniquement du transport des sédiments en suspension et à leur dépôt, en analysant une archive sédimentaire formée par une succession de couches d'alluvions déposées lors des crues majeures des dernières décennies. On s'attaque aux processus liés aux crues et à des échelles de temps plus courtes. À l'échelle du bassin versant de la rivière Jiu, le charbon est un atout dans la démarche d'analyse des transferts sédimentaires.

Dans le *septième chapitre*, l'échelle temporelle de la crue a été choisie pour la recherche de l'origine des sédiments fins. En l'absence des données sur les débits d'alluvions en suspension, nous avons utilisé des données journalières des débits liquides. Cette s'est montré pertinente, car la cinétique des deux paramètres n'est pas très différente, les matières en suspension étant transportées presque à la même vitesse que l'onde de crue. Nous avons cherché à mettre en correspondance les couches sédimentaires déposées sur les berges de la rivière Jiu dans son secteur inférieur (à Podari) avec l'historique des crues susceptibles à déborder, et pour y arriver, on a analysé 27 crues produites entre 2002 et 2014, avec de débits de pointe supérieurs à  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Afin d'identifier l'origine géographique de chaque crue (les contributions respectives des bassins versants des principaux tributaires de la rivière Jiu), nous avons considéré 13 indices de crue basés principalement sur le volume total ou maximal. A chaque fois, la station hydrométrique principale en aval de toutes les sources possibles a été utilisée comme référence pour les rapports entre les paramètres hydrologiques composant les indices. À la fin de ce chapitre, un tableau synthétique contenant des considérations sur les contributions potentielles des sous-bassins versants de la Jiu a été fourni.

Dans le *huitième chapitre*, les sédiments fins échantillonnés dans les lits des rivières, ainsi que les spécimens de charbon brut provenant des zones source et d'accumulation ont été analysés. Le premier sous-chapitre a insisté sur la stratégie d'échantillonnage, à la fois pour les sédiments du lit de la rivière Jiu et de ses affluents et pour le dépôt récent sur la rive de la Jiu juste en aval de la station hydrométrique de Podari. Le deuxième sous-chapitre détaille les aspects liés aux méthodes de laboratoire, utilisées pour l'analyse des échantillons de sédiments fins, les méthodes étant expliquées en termes protocole de mesure, avantages et inconvénients : colorimétrie, granulométrie, analyse d'image, pétrologie, teneur en carbone, spéciation du charbon et métaux lourds.

Dans le *neuvième chapitre*, une partie des méthodes de laboratoire appliquées aux échantillons prélevés de la berge accumulative de la rivière Jiu a servi à confirmer la stratigraphie des 11 couches alluviales identifiées dans la tranchée de Podari. Dans le deuxième sous-chapitre, nous avons détaillé le protocole de terrain et de laboratoire de la couche basale de la tranchée, en vue de l'analyse par datation OSL de l'âge du dépôt.

Enfin, le *dixième chapitre* rapproche les différents résultats de cette seconde partie, portant sur l'hydrologie (indices de crue) et les méthodes de laboratoire pour l'analyse des sédiments fins. Les couches alluviales se sont vues attribuer une signification hydrologique en termes de débit minimal nécessaire pour les déposer et de lien entre leur altitude et le niveau de la rivière à atteindre pendant les inondations. Ensuite, les résultats des méthodes de laboratoire ont été présentés dans le but de caractériser les sources potentielles de sédiments (provenance des espèces de charbon, relation entre la couleur et le contenu en charbon, les sources de minéraux rares et leur lien avec le contexte géologique, l'examen pétrologique et pétrographique de la matière sédimentaire fine à travers les échantillons). À la fin, un tableau récapitulatif final met en relation les couches alluviales, les évènements de crue et leurs zones sources et les sous-bassins contributifs ou les zones sources des éléments chimiques repérés.

## ***11.2. Conclusions générales sur la démarche méthodologique***

### **11.2.1. Retour d'expérience sur la démarche méthodologique : points forts et limites**

Afin d'atteindre l'objectif de la thèse et répondre aux questions de la recherche, nous avons mis en place plusieurs approches. La concordance entre le titre de la thèse et le travail accompli n'est pas simple. On pourrait peut-être s'attendre à ce que nous abordions les flux hydro-sédimentaires sur la base de séries de données à différents pas de temps, et d'analyser les voies de transport des sédiments. En réalité, pas tous les aspects liés à la dynamique hydro-sédimentaire ont pu être investigués, vu les fortes contraintes de cette thèse (manque de données fiables sur les débits d'alluvions, budget limite et temps court d'effectuer tous les types d'analyses etc). Dans ce contexte, nous avons choisi de limiter notre étude en valorisant les données auxquelles nous avons eu accès (avec pas mal de difficulté) et que nous avons obtenues par propres moyens (mesures de terrain, échantillonnage). Pour le flux solide, nous avons pris en considération que les sédiments en suspension et cela par une approche particulière et originale, basée sur l'analyse des dépôts sédimentaires des lits et des berges qui ont été mis en relation avec les crues. L'analyse du transport par charriage n'a pas été possible pour plusieurs raisons. Evaluer la capacité de la rivière à transporter des sédiments de granulométrie grossière (des petits cailloux au gravier et aux rochers) pourrait être une tâche difficile en raison du manque de données (relevés topographiques, granulométrie du fond, caractéristiques

géomorphologiques, etc) et d'équipement appropriés, ainsi que du temps suffisant pour une zone d'étude aussi vaste de plusieurs milliers de kilomètres carrés. En outre, cela impliquerait de maîtriser et d'appliquer des techniques de mesure qui prennent du temps à apprendre et qui rendraient l'analyse hydro-sédimentaire encore plus compliquée (voir [Petrut, 2017](#)).

Les données hydrologiques que nous avons utilisées ont une résolution temporelle qui n'est pas tout à fait satisfaisante. Elles ont été valorisées pour créer des indices hydrologiques afin d'identifier les sous-bassins contribuant à la dynamique hydro-sédimentaire. La relation amont-aval a été étudiée avec les techniques modernes de SIG, bien que la résolution spatiale des modèles numériques de terrain et de l'imagerie aérienne fût assez faible. Nous considérons que l'analyse systémique de la variabilité hydrologique, des processus géomorphologiques et de la connectivité sédimentaire du bassin de la rivière Jiu est une idée à conserver, mais il convient de prêter davantage d'attention aux procédures et à la précision cartographiques, aux bases de données spatiales, à la résolution des cartes et à la qualité des données hydrologiques. Toute donnée manquante ou incertaine (comme dans notre cas l'obtention indirecte de la concentration en sédiments ou le modèle numérique de terrain à une échelle médiocre de 1.25.000) induit des erreurs et réduit la confiance dans les résultats, en poussant le chercheur d'adopter des solutions de compromis et des approches type „proxy”.

Sur le terrain, nous avons échantillonné des sédiments et du charbon brut provenant de sites accessibles, ainsi que de sites clés en termes de transfert et de dépôt. Nous avons ensuite utilisé de diverses méthodes de laboratoire pour analyser les propriétés de ces échantillons, l'accent étant mis sur la teneur en charbon et son espèce (lignite et houille). Certaines des méthodes étaient largement documentées et utilisées à de nombreuses reprises dans des études antérieures similaires (granulométrie, teneur en carbone, métaux lourds), tandis que d'autres ont été utilisées en première dans notre étude (analyse d'image pour estimer la teneur en charbon en classant les particules de charbon parmi d'autre type de particules) or elles sont spécifiques pour d'autres fins scientifiques (la colorimétrie n'a jamais été utilisée auparavant pour distinguer le contenu en charbon des sédiments ou la pétrologie n'était pas couramment considérée comme un outil pour les hydrologues).

Le travail difficile sur les indices de crue et l'impossibilité d'utiliser une période d'analyse plus longue (les crues antérieures à 2001 n'ont pas été étudiées) font de cette approche un compromis entre l'objectif à satisfaire, le délai et les données hydrologiques disponibles. En outre, la stratégie d'analyse spatiale à l'échelle des trois niveaux (secteurs) du bassin versant a été possible pour le bassin de la rivière Jiu, compte tenu de sa taille, de sa morphologie et de la répartition spatiale de la station hydrométrique sur les rivières concernées. Nous ne pouvons pas garantir qu'une même approche (répartition dans les trois secteurs du bassin hydrographique) serait adéquate pour un autre contexte spatial, notamment en ce qui

concerne les bassins complémentaires. Nous avons vu même dans notre bassin que les superficies non jaugées (les bassins complémentaires), pour lesquelles nous ne connaissons pas les flux hydrologiques, peuvent jouer un rôle important et il est recommandé d'appliquer les indices dans les cas où il y a des stations hydrométriques proches des confluences avec les rivières principales.

L'échantillonnage des dépôts de sédiments fins permettant d'analyser les effets du transfert des sédiments provenant de l'ensemble du bassin versant s'avèrent être une solution efficace à plusieurs points de vue :

- Tout d'abord, la composition des sédiments fins change toujours en fonction des zones traversées et ceux-ci conservent toujours certaines caractéristiques initiales des zones source. Ainsi, les sédiments fins offrent des informations précieuses sur les processus impliqués dans leur transport, leur temps de parcours dans le bassin hydrographique et la géochimie des sources et des sites de dépôt intermédiaires.

- Deuxièmement, les sédiments fins formant un dépôt alluvial de berge se prêtent à différentes méthodes d'analyse dans le laboratoire. Quand même, pas toutes les méthodes de laboratoire essayées peuvent aider à trouver les sources potentielles de sédiments. Nous admettons que certaines méthodes ont été considérées soit comme une exploration expérimentale, soit comme un complément à d'autres méthodes principales. De ce point de vue, les dépôts de sédiments fins ont joué un rôle important dans le choix des méthodes de laboratoire les plus capables à fournir des résultats sur les possibles sources de sédiments.

- Le troisième point concerne la stratégie générale et l'ordre des méthodes appliquées dans l'analyse des sédiments. A cause des contraintes et difficultés avec lesquelles nous nous sommes confrontés, cette étude a été réalisée avec des moyens peu coûteux et des données ou méthodes ont été ajoutées au fil du temps. Malgré les difficultés rencontrées, l'analyse d'un dépôt alluviale est toujours flexible et peu sensible à l'ordre des méthodes et à la chronologie de leur application. Toutefois, une leçon à apprendre pour des futures recherches est de procéder à la confirmation de la stratigraphie avant toute autre enquête des dépôts sédimentaires et pas au final.

### **11.2.2. Réplication de l'étude et recommandations**

La méthodologie de recherche que nous avons suivie pourrait s'appliquer certainement à un autre bassin hydrographique avec le même objectif : analyser les flux hydro-sédimentaires. À notre avis, il n'y a pas de différence entre les processus et les facteurs régissant la dynamique hydro-sédimentaire entre le bassin de la rivière Jiu et tout un autre bassin versant et il est généralement admis qu'une grande partie du transport de sédiments fins se produit toujours à l'échelle temporelle de la crue. Les inconvénients et les

différences peuvent apparaître du point de vue du rapport complexité - simplicité, le bassin de la rivière Jiu étant une zone d'étude très complexe caractérisée par de multiples sources de sédiments, aussi qu'anthropique. Peut-être il n'est pas besoin de toutes les approches que nous avons adoptées si nous travaillions dans un autre bassin versant. Cependant, il y a toujours quelques conseils généraux à donner. Pour des travaux futurs, nous recommandons en premier de rechercher plus de sites d'accumulation et de les dater, de confirmer l'âge, puis d'échantillonner systématiquement les couches et de déterminer leur altitude exacte par des mesures topographiques. Ainsi, tout le travail que nous avons fait pour estimer l'élévation des couches sur la base de la topographie des sections en travers à la station hydrométrique de Podari pourrait être évité. Afin d'assurer la représentativité des couches alluviales, nous recommandons aussi le travail sur plusieurs tranchées. Notamment, lors du choix d'une rive d'accumulation, nous recommandons qu'il soit le plus proche possible d'une station hydrométrique et que le dépôt alluvial soit récent, pour avoir la possibilité de relier les couches sédimentaires avec l'historique des événements hydrologiques. Cela peut être fait par diverses techniques de datation, en fonction du budget et de l'expérience du chercheur, mais il est préférable que l'échantillonnage à cet effet soit effectué en même temps que l'échantillonnage pour les analyses de laboratoire, afin d'éviter toute destruction ou mélange ultérieur des couches sédimentaires.

À tout cela, nous pourrions ajouter deux caractéristiques particulières du bassin de la rivière Jiu qui pourraient poser de problèmes dans tout autre environnement fluvial, ou au contraire, faciliter le travail. Tout d'abord, il s'agit des zones d'exploitation du charbon, qui ont joué un rôle crucial dans l'orientation de notre stratégie de traçage vers les zones et les processus contribuant à l'enrichissement des sédiments en particules de charbon. Le charbon était en effet un allié incontestable dans nos recherches et une grande partie du travail de laboratoire a tourné autour de cela. Ainsi, dans un autre bassin hydrographique où un tel traceur n'est pas présent, une grande partie des méthodes devrait être retirée de la stratégie de recherche (i.e. la colorimétrie, s'il n'y a pas de roches aux couleurs distinctes, facilement à conserver dans toutes les conditions fluviales, qui seraient impliquées dans le transfert des sédiments, ou bien l'analyse d'images). Deuxièmement, les aménagements sur la rivière Jiu et sur certains de ses affluents (les réservoirs agissant comme des pièges à sédiments dans le secteur situé entre les montagnes et Rovinari, le système hydro-énergétique modifiant radicalement le régime hydrologique sur la rivière Tismana, d'autres ouvrages en construction, les digues tout au long de la Jiu entre Filiași et Craiova, la dérivation de l'eau dans le secteur supérieur, etc.) compliquent davantage la dynamique hydro-sédimentaire. Le temps et les moyens nous n'ont pas permis de les prendre en compte pour une éventuelle modélisation, mais le simple fait de les connaître a apporté un plus d'information à l'analyse générale du système hydro-sédimentaire du bassin de



la rivière Jiu. Dans un bassin hydrographique aussi complexe, il faut choisir le nombre de facteurs à prendre en compte, ce qui en laissera toujours certains de côté pour des études futures.

### ***11.3. Limites de l'approche et perspectives***

Cette recherche a permis de montrer une facette de la dynamique hydro-sédimentaire du bassin de la rivière Jiu. De nombreuses méthodes ont été mises en place pour identifier l'origine et la nature des sédiments fins, les liens entre les zones source et les impacts (dépôts) dans les lits des rivières, ainsi que le rôle joué par les crues et les inondations dans le transfert des sédiments. Néanmoins, quelques approches n'ont pas pu être plus développées, car nous aurions eu besoin de plus de temps et des moyens techniques et financiers pour les appliquer.

Par conséquent, la recherche pourrait continuer et nous envisageons déjà quelques axes prioritaires pour l'avenir. Pour aller plus loin, il faudra tenir compte des limites, erreurs et renseignements de cette première expérience.

#### **11.3.1. Analyses hydrologiques à des échelles spatiales et temporelles plus fines**

Nous sommes conscients que les données hydrologiques sont difficiles à obtenir et qu'il y a encore du travail à faire pour des approches statistiques plus complexes (projections futures, modélisations des débits manquants etc), afin d'analyser d'une manière plus complexe les débits liquides et solides, ainsi que d'estimer le budget sédimentaire à partir des mesures existantes. Dans cette étape, seules quelques méthodes hydrologiques classiques ont été appliquées, principalement en raison du peu de temps qui nous est resté entre le moment où les données nous ont été fournies et la fin de la thèse. Une leçon à tirer serait d'assurer une accessibilité rapide aux données au début du travail.

#### **11.3.2. Une image holistique des processus géomorphologiques**

Bien que beaucoup d'efforts aient été déployés pour cartographier les processus géomorphologiques, cela n'a pu être fait que sur une zone tampon de 1 km le long des principales rivières. Le bassin versant de la rivière Jiu est très complexe et une cartographie complète demanderait beaucoup de temps. Nous avons laissé l'achèvement de cette base de données spatiale, ainsi que sa valorisation ultérieure dans des modèles de distribution de sédiments pour des projets futurs. L'accent a été mis sur l'analyse de la connectivité entre les zones minières (en tant que sources de charbon dans les sédiments) et la rivière Jiu. Pour l'avenir, nous envisageons des analyses plus détaillées pour évaluer le degré de connectivité entre les processus géomorphologiques et les rivières.

### **11.3.3. Amélioration des techniques de laboratoire**

En perspective, nous souhaiterions nous concentrer davantage sur les analyses géochimiques et approfondir l'étude des sources de minéraux rares et de charbon en effectuant plus d'échantillonnage dans des zones clés. Nous sommes convaincus qu'une meilleure stratégie d'échantillonnage pourrait être adoptée, à la fois pour les échantillons de sédiments ou de charbon des zones sources, que pour les dépôts alluviaux de berge. En termes de leur composition, nous allons essayer d'améliorer la méthode d'analyse d'images dans le programme FijiJ et de continuer l'investigation que sur certains éléments que nous avons trouvés plus abondants dans les sédiments (tels que Ti, Zr). Nous souhaitons également apprendre et appliquer de nouveaux outils géochimiques pour traiter les informations brutes sur le contenu de différents éléments dans les sédiments fluviaux.

### **11.3.4. Indices de crue – intégration des sous-bassins d'ordre supérieur et automatisation du calcul**

En ce qui concerne les indices de crue, en perspective il serait possible d'améliorer la méthode en conservant que les indices les plus pertinents, en les appliquant à plusieurs échelles spatiales, en allant de plus en plus en amont et sur des affluents de second et troisième ordre (les données hydrologiques sont disponibles). Le calcul automatique des indices faciliterait le travail et nous recherchons les moyens de le faire dans R Studio. Nous pourrions également élargir cette analyse du point de vue temporel, en considérant aussi les crues antérieures à 2000.

### **11.3.5. Techniques de datation - obligatoires pour connaître l'âge des dépôts alluviaux**

Bien que pour cette étape de recherche, la technique OSL a prouvé son utilité pour notre dépôt sédimentaire de berge, les incertitudes étaient élevées. Dans les approches futures, outre le fait de trouver un dépôt alluvial approprié avec un accès facile, afin de pouvoir l'explorer à plusieurs reprises, une technique de datation plus précise est souhaitée. Plus nous sommes certains du temps de dépôt de chaque couche de sédiments, plus de moyens de valider les autres méthodes (hydrologiques et géochimiques) nous avons.

### **11.3.6. Approches méthodologiques pour répondre aux questions sur les échelles spatio-temporelles de la dynamique hydro-sédimentaire**

Les mesures et l'échantillonnage envisagés devront se faire systématiquement, de préférence chaque année, pour capturer la variabilité interannuelle des sources et caractéristiques des sédiments. Nous avons seulement réussi à analyser une série d'échantillons, ce qui n'est pas suffisant pour généraliser sur

les sources possibles de sédiments. En même temps, nous devons aussi faire attention à prélever les échantillons à intervalles réguliers chaque jour pour ensuite connaître le régime hydrologique en utilisant la chronique des débits. Il est très difficilement à faire des mesures et à échantillonner à une telle fréquence, ce qui introduit des limites spatiale et temporelles à notre étude. Enfin, au moins au droit de la future tranchée sédimentaire, un profil en travers devrait être réalisé, afin de relier la variabilité hydrologique avec l'historique des dépôts et les changements dans la morphologie du lit dans la section d'étude.

## Bibliographie

- (Allain) Jégou, C., Belleudy, P., **2002**. Flow sediment transport and development of vegetation in river beds. *Proceedings of the 3rd International Conference on Water Resources and Environment Research. Water Quantity and quality aspects in modeling and management of ecosystems*, Dresda.
- Acreman, M.C., Ferguson, A.J.D., **2010**. Environmental flows and the European Water Framework Directive. *Freshwater Biology*, 55, 32–48. doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02181.x
- Adaikpoii, E.O., Nwajei, G.E., Ogala, J.E., **2005**. Heavy metals concentrations in coal and sediments from River Ekulu in Enugu, Coal City of Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 9(2), 5-8. doi.org/10.4314/jasem.v9i3.17343
- Adeloye, A., Montaseri, M., **2002**. Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study / Analyses préliminaires des données de débit en vue d'une étude de planification des ressources en eau. *Hydrological Sciences Journal*, 47, 679-692. DOI : 10.1080/02626660209492973.
- Agnelli, A. (edit), **1992**. *Dinamica Morfologica Recente dell'Alveo del Fiume Arno*, CNR-GNDCI, vol. 1739, Pisa, Pacini, 191 pp.
- Aitken, M.J., **1985**. *Thermoluminescence Dating*. Academic Press, London, 359 p. ISBN: 978-0120463800
- Aksoy, H., Kavvas, M.L., **2005**. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models, *CATENA*, 64 (2-3): 247-271 p, DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.008.
- Alcayaga, H.A., **2013**. *Impacts morphologiques des aménagements hydroélectriques à l'échelle du bassin versant* (Thèse de doctorat), Université Grenoble Alpes, 154p.
- Alcayaga, H.A., Mao, L., Belleudy, P., **2016**. Predicting the geomorphological responses of gravel-bed rivers to complex hydropower plant schemes at the watershed scale: An application in an Alpine watershed. Article non-publié, 21p.
- Alexandersson, H., **1986**. A homogeneity test applied to precipitation data. *Climatology*, 6, 661 – 675; doi.org/10.1002/joc.3370060607.
- Alexandrescu, V., **1995**. *Depresiunea Petroșani: studiu de geografie a așezărilor umane*. Thèse doctorale, Université de Bucarest, Bucarest.
- Alexandrov, Y., Cohen, H., Laronne, J.B., Reid, I., **2009**. Suspended sediment load, bed load, and dissolved load yields from a semiarid drainage basin: A 15-year study, *Water Resour. Res.*, 45, W08408, doi: 10.1029/2008WR007314.
- Alexandrov, Y., Laronne, J., Reid, I., **2003**. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments*, 53, 73–84; doi.org/10.1006/jare.2002.1020:
- Alexandru, M., Badea, L., Bălțeanu, D., Buza, M., Cioacă, S., Sandu, M., **1979**. *Carte geomorphologique générale 1:200 000, feuille Pitești*, Institut de Geographie de l'Academie Roumaine.
- Alexandru, M., Badea, L., Bălțeanu, D., Cioacă, A., Niculescu, G., Sandu, M., **1983**. *Carte geomorphologique générale 1:200 000, feuille Târgu Jiu*, Institut de Geographie de l'Academie Roumaine.
- Alfonsi, P., **1997**. Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains. Exemples de La Clapière et de Séchilienne (France). *Revue française de géotechnique*, 79, p. 3-12.
- Ali, H., Khan, E., **2017**. What are heavy metals? long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition, *Toxicological & Environmental Chemistry*, pp. 1–25, doi:10.1080/02772248.2017.1413652.
- Allain Jégou, C., **2002**. *Relations vegetation – écoulement – transport solide dans le lit des rivières. Etude de l'Isère dans le Grésivaudan* (Thèse doctorale), Université Grenoble Alpes. 206 p
- Allen, J.R.L., **1985**. *Principles of Physical Sedimentology*, George Allen and Unwin, Londres, 272 p.
- Allen, T., **2003**. *Powder Sampling and Particle Size Determination*, Elsevier, Amsterdam, 682 p.
- Allison, R.J. (coord.), **2002**. *Applied Geomorphology. Theory and Practice*, John Wiley&Sons, Chichester, 480 p.

- Amaral, C.D.B., Machado, R.C., Barros, J.A.V., Virgilio, A., Schiavo, D., Nogueira, A.R., Nobrega, J.A., **2017**. Determination of rare earth elements in geological and agricultural samples by ICP – OES. *Spectroscopy*, 32(10), 32-36 p.
- Amoros, C., Petts, G.E. (edit), **1993**. *Hydrosystèmes fluviaux*. Collection Écologie no 24, Masson, Paris, xix + 300 p., 110 fig., 20 tabl., 16 x 24 cm, 290FF. ISBN 2-225-842246-9.
- Amoros, C., Rostan, J.C., Pautou, G., Bravard, J-P., **1987**. The reversible process concept applied to the environmental management of large river systems, *Environmental Management*, 11, 607. <https://doi.org/10.1007/BF01880159>
- ANAR, **2012**, *Administrația Națională “Apele Române” – prezent și viitor în domeniul managementului integrat al resurselor de apă*, 82 p.
- Anastasiu, N., Grigorescu, D., Mutihac, V., Popescu, Gh., **2007**. *Dictionnaire de géologie*, Maison d’ Edition Didactique et Pedagogique, Bucarest, 347 p.
- Andréassian, V., Bourgin, F., Oudin, L., Mathevet, T., Perrin, C., Lerat, J., Coron, L., Berthet, L., **2014**. Seeking genericity in the selection of parameter sets: impact on hydrological model efficiency. *Water Resources Research*, 50(10), 8356-8366. doi: 10.1002/2013WR014761.
- Androhovici, A., Iordache, S., **1994**. *Hidrogeologia și cărbunii*, Maison d’ Edition de l’Université de Bucarest, 95-144.
- Anechitei-Deacu, V., Constantin, D., Timar-Gabor, A., **2013**. Anexa III. Prelucrarea probelor pentru datarea prin luminescență. Annexe du volume *Dozimetrie prin termoluminescență (TL) și luminescență stimulată optic (OSL): aplicații în studii de mediu*, Presa Universitară Clujeană, 383 - 393 (Timar-Gabor, A., 400 p. ISBN: 978-973-595-534-2.)
- Angelo, M., **2010**. Corn, Carbon and Conservation: Rethinking U.S. Agricultural Policy in a Changing Global Environment. *Geo. Mason L. Rev.*, 17. DOI: 10.2139/ssrn.1537178.
- Anguela, T.P., **2004**. Etude du transfert d’eau et de solutes dans un sol a nappe superficielle drainée artificiellement, ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL DES EAUX ET DES FORETS, These pour obtenir le grade de Docteur de l’ENGREF, soutenue par Thais PARIS ANGUELA, l’Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts
- Anhwange, B.A., Agbaji, E.B., Gimba, E.C., **2012**. Impact assessment of human activities and seasonal variation on River Benue, within Makurdi Metropolis, *International Journal of Science and Technology*, 2(5), 248-254.
- Arcement, G.J., Schneider, V.R., **1990**. Water-Supply Paper 2339, Guide for Selecting Manning’s Roughness Coefficients for Natural Channels and Floodplains, United States Geological Survey.
- Arganda-Carreras, I., Kaynig, V., Rueden, C., **2017**. Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy pixel classification. *Bioinformatics* (Oxford Univ Press) Bioinformatics btx180, doi:10.1093/bioinformatics/btx180 (on Google Scholar).
- Arghiuș, V., **2008**, *Studiul viiturilor de pe cursurile de apă din estul Munților Apuseni și riscurile asociate*. Edit. Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca
- Arihood, L.D., **1986**. *Description of sediment data collected by the U.S. Geological Survey in small watersheds in coal-mining areas of the Eastern United States, 1980-84*, Open File Report, 14 p. doi.org/10.3133/ofr86309
- Armaș, I., **2011a**. An analytic multicriteria hierarchical approach to assess landslide vulnerability. Case study: Cornu Village/Romania, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 55(2), 209-229.
- Armaș, I., **2011b**. Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping. Prahova Subcarpathians, Romania. *Natural Hazards*, 60(3), 937-950. DOI: 10.1007/s11069-011-9879-4.
- Armaș, I., Vartolomei, F., Stroia, F., **2014**. Landslide susceptibility deterministic approach using geographical information systems: application to Breaza city, Romania. *Natural Hazards*, 70(2), 995-1017. DOI: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11069-013-0857-x>
- Arnaud-Fassetta, G., Fort, M., **2004**. La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l’évolution récente (1956-2000) de la bande active du Haut Guil, Queyras, Alpes françaises du Sud. *Méditerranée*, 1-2, 143-156.
- Arnett, R. R., **1979**. The use of differing scales to identify factors controlling denudation rates. *Pitty, A. F. (Ed.) Geographical Approaches to Fluvial Processes*, Geobooks, Norwick, 300 p.



- Arnold, F., Viggiano, A.A., Ferguson, E.E., **1982**. Combined mass spectrometric composition measurements of positive and negative ions in the lower ionosphere—II. *Negative ions, en Planetary and Space Science*, 30(12), 1307-1314, ISSN 0032-0633, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90104-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90104-0).
- Ashmore, P., Day, T.J., **1988**. Effective Discharge for Suspended Sediment Transport in Streams of the Saskatchewan River Basin. *Geography Publication*, 864 – 870, doi.org/10.1029/WR024i006p00864
- Atkinson, T., **1984**. A review of hydrological investigations for deep coal mines, with special reference to petrophysical methods. *International Journal of Mine Water*, **3**(3), 19-34, doi.org/10.1007/BF02505837
- Ayache, A., Hamonier, J., **2016**. *Cours de statistique descriptive*, Université Grenoble Alps, 39 p.
- Azmera, L.A., **2009**. *Estimation of Ravine Sediment Production and Sediment Dynamics in the Lower Le Sueur River Watershed, Minnesota*, FIU Electronic Theses and Dissertations. Paper 142, 91 p, DOI: 10.1007/978-3-319-18787-7\_23
- Babinski, Z., **2005**. The relationship between suspended and bed load transport in river channels. *Sediment Budgets 1 (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005)*. IAHS Publ. 291, 182 – 188.
- Bača, P., **2008**. Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 224-235, doi: 10.1623/hysj.53.1.224
- Bachet, M., **1934**. Note sur la propagation et l'annonce des crues. *Annales des Ponts et Chaussées*, 409-463
- Badea, L., **1967**. *Subcarpații dintre Gilort și Cerna Oltețului (Studiu geomorfologic) [Les subcarpates entre Gilort et Cerna Oltețului (Etude géomorphologique)]*, Maison d'Édition de l'Académie, Bucarest, 191 p.
- Badea, L., **1970**. Terasale fluviatile din Oltenia. Studii și cercetări de geol., geofiz., geogr. [Les terrasses fluviatiles de l'Oltenie, Etudes et recherches de géologie, géophysique, géographie], *serie Géographie*, volume XVIII, no1.
- Badea, L., **1971**. *Valea Jiului [La vallée du Jiu]*, Maison d'Édition Scientifique, Bucarest, 216 p.
- Badea, L., **1973**. *Piemontul Getic, Concluzii la un studiu de geomorfologie regională*. En Piemonturile, Centrul de Multiplicare al Universității din Bucarest, Bucarest.
- Badea, L., Bălțeanu, D., **1978**. Influences neotectoniques et lithologiques dans les Subcarpates Getiques a l'ouest de l'Olt, *Stud Geom Carp-Balc*, XII, Krakow.
- Badea, L., Buza, M., Sandu, M., Sima, M., Micu, M., Jurchescu, M., **2012**. *Unitățile de relief ale României, V. Câmpiile pericarpatice. Câmpia Banatului și Crișanei, Câmpia Română, Lunca Dunării, Delta Dunării și Câmpia Litorală [Les unités de relief de la Roumanie, V, Les plaines péricarpathiques. La plaine du Banat et de la Crisana, la plaine Roumaine, la vallée du Danube; le Delta du Danube et la plaine littorale]*, Maison d'Édition Ars Docendi, Bucarest.
- Badea, L., Ghenovici, A., **1974**. *Județul Dolj [Le département Dolj]*, La Maison d'Édition de l'Académie de la République Socialiste Roumaine, Bucarest, 155p.
- Badea, L., Niculescu, G., Roată, S., Buza, M., Sandu, M., **2001**. *Unitățile de relief ale României I. Carpații Meridionali și Munții Banatului [Les unités de relief de la Roumanie, I, Les Carpathes Meridionaux et les Montagnes du Banat]*, Maison d'Édition Ars Docendi, Bucarest.
- Badea, L., Niculescu, G., Sandu, M., Roată, S., Micu, M., Sima, M., Jurchescu, M., **2008**. *Unitățile de relief ale României III. Dealurile pericarpatice. Dealurile Crișanei și Banatului, Subcarpați [Les unités de relief de la Roumanie, III, Les collines péricarpathiques. Les collines de la Crisana et du Banat, les Subcarpates]*, Maison d'Édition Ars Docendi, Bucarest.
- Badea, L., Sandu, M., Buza, M., **2010**. *Unitățile de relief ale României IV. Podișurile pericarpatice [Les unités de relief de la Roumanie, IV, Les plateaux pericarpatiques]*, Maison d'Édition Ars Docendi, Bucarest.
- Bagnold, R. A., Barndorff-Nielsen, O., **1980**. The pattern of natural size distributions. *Sedimentology*, **27**, 199-207; doi.org/10.1111/j.1365-3091.1980.tb01170.x
- Bagnold, R.A., **1966**. An approach to the sediment transport problem from general physics. *Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers. Geological Survey Professional Paper*, 422 – 1, 43 p.
- Bailey, R.M., Smith, B.W., Rhodes, E.J., **1997**. Partial bleaching and the decay form characteristics of Quartz OSL. *Radiation Measurements*, 27(2), 123 – 136.
- Baker, V.R., **1973**. *Paleohydrology and Sedimentology of Lake Missoula Flooding in Eastern Washington*, Boulder, Colorado: Geological Society of America, 79 p. ISBN 081372144X

- Balakrishna, K., Probst, J.-L., **2005**. Organic carbon transport and C/N ratio variations in a large tropical river: Godavari as a case study, India, *Biogeochemistry*, 73(3). 457-473, doi.org/10.1007/s10533-004-0879-2
- Balescu, S., Lamothe, M., Panaiotu, C., Panaiotu, C., **2010**. La chronologie IRSL des séquences loessiques de l'est de la Roumanie, *Quaternaire*, 21(2), 115 – 126. DOI: [10.4000/quaternaire.5488](https://doi.org/10.4000/quaternaire.5488)
- Banks, C.J., Heaven, S., **2013**. *Optimisation of biogas yields from anaerobic digestion by feedstock type. Chaptreitre en The Biogas Handbook. Science, Production and Applications* (512 p), Wllinger et al. Editor, Woodhead Publishing, 131-165. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.131>
- Baptista, M., **1990**. *Contribution à l'étude de la propagation de crues en hydrologie*. Thèse de Doctorat en Hydrologie. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 292 p.
- Baranovsky, N., Neamu, G., **1971**. *Județul Gorj*, Edit. Academiei Republicii Socialiste România, București, 144p.
- Barbat, A.C., Caraion-Buzdea, C., Corici, M., Gotia, C., Corneanu, M., **2012**. Resident's perception of coal industry long-term pollution in the Jiu Middle Valley (Romania): premise for environmental education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 46, 870 – 874.
- Barbălată, C., **2002** [Mutihac et al., 2004](#). *Regimul de scurgere al râurilor din bazinul Jiu: these doctorale/ drd.:* Barbălată Costel ; cond. șt.: prof. univ. dr. Ion Zăvoianu. - București : Institutul de Geografie.
- Barbu, I., **1986**. *A doua tinerețe a cărbunilor*, Editura Albatros, Bucarest
- Bargués Tobella, A., Reese, H., Almaw, A., Bayala, J., Malmer, A., Laudon, H., Istedt, U., **2014**. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso, *Water Resources Research*, **50**(4), 3342–3354.
- Baron, M., **2006**. *Din istoria mineritului aurifer în România 1918-1948*, Edit. Universitas, Petroșani, 224 p.
- Barthod, L.R.M., Liu, K., Lobb, D.A., Owens, P.N., Martínez-Carreras, N., Koiter, A.J., Petticrew, E.L., McCullough, G.K., Liu, C., Gaspar, L., **2015**. Selecting Color-based Tracers and Classifying Sediment Sources in the Assessment of Sediment Dynamics Using Sediment Source Fingerprinting. *Journal of Environmental Quality. Technical reports - Landscape and Watershed Processes*, 1605-1616
- Bartl, S., Schumberg, S., Deutsch, M., **2009**. Revising time series of the Elbe river discharge for flood frequency determination at gauge Dresden, *Natural Hazards Earth Systems Sciences*, 9, 1805 – 1914.
- Bauder, J., Singer, A., **2017**. TDS Fact Sheet, [https://web.archive.org/web/20150429145631/http://waterquality.montana.edu/docs/homeowners/tds\\_fact\\_sheet.shtml](https://web.archive.org/web/20150429145631/http://waterquality.montana.edu/docs/homeowners/tds_fact_sheet.shtml), dernier accès le 14.10.2019
- Baudoin, J.M., Boutet-Berry, L., Cagnant, M., Kreutzenberger, K., Lamand, F., Malavoi, J.-R., Marmonier, P., Penil, C., Riviere, C., Sadot, M., Tual, M., **2015**. *CARHYCE: CARactérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau*. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur des cours d'eau prospectables à pied, 64 p.
- Bădău, A.B., **2014**. The minier industry from Jiu Valley – environmental and social influences. *Annals of the „Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu, Economy Series, Special Issue/2014- Information society and sustainable development*, 103-106.
- Bădulescu, C., Sârbu, R., **2006**. Impactul activităților de procesare a cărbunelui din Valea Jiului asupra mediului [L'impacte des activites de traitement du charbon de la Vallée du Jiu sur l'environnement]. *Buletinul AGIR*, **3**, 76-79.
- Bălan, V., Ionescu, Ș, Țișteea, N., Banciu, D., Marinică, I., **1984**. Studio Studiu statistico-sinoptic asupra precipitațiilor abundente în Oltenia. *Culegerea de lucrări "Probleme ale rețelei meteorologice"*, Edit. I.M.H., București, 93 – 109.
- Bălțeanu, D., **1974**. Relațiile dintre curgerile de noroi și eroziunea torențială în modelarea versanților din Subcarpații Buzăului. *SCGGG, Serie Géographie*, XXI, 1.
- Bălțeanu, D., **1983**, *Experimentul de teren în geomorfologie Subcarpații Buzăului*, Edit. Acad RSR, Bucarest, 157p.
- Bălțeanu, D., **1997**, Geomorphological hazards of Romania. En Embleton C, Embleton-Hamann Ch (coord) *Geomorphological hazards of Europe*. Elsevier, Amsterdam, 409–427.
- Bălțeanu, D., Dinu, M., Cioacă, A., **1989**, *Hărțile de risc geomorfologic* (Exemplificări din Subcarpații și Podișul Getic), SCGGG–Geogr., XXXVI.

- Bălțeanu, D., Jurchescu, M., Surdeanu, V., Ioniță, I., Goran, C., Urdea, P., Rădoane, M., Rădoane, N., Sima, M., **2012**, *Recent landform evolution in the Romanian Carpathians and pericarpethians regions*. En Lóczy D et al (eds) Recent landform evolution: the Carpatho-Balkan-Dinaric region. Springer Science+Business Media M.V., 249–286
- Bălțeanu, D., Micu, M., **2009**, *Landslide investigation: from morphodynamic mapping to hazard assessment. A case study in the Romanian Subcarpathians, Muscel catchment*. En Malet J-Ph, Remaitre A, Bogaard T (coord.) Landslide Processes. From geomorphologic mapping to dynamic modelling. CERG Editions, Strasbourg, 235–241.
- Bălțeanu, D., Tanislav, D., Murătoareanu, G., Sencovici, M., **2005**. Hazardele naturale si dezvoltarea durabila in Subcarpatii si Podisul Getic de la vest de Olt, Raport de Cercetare, *Revista de Politică a Științei și Șcientometrie*, nr. special, ISSN 1582-1218.
- Bălțeanu, D., Teodoreanu, V., **1983**, The mass movement from Malu Alb. En Excursion guidebook symposium “The role of geomorphological field experiments in land and water management”, Bucarest, 77–80.
- Bărăiac, O., **2011**. *Cercetări privind dezvoltarea durabilă în bazinul minier Valea Jiului*. Rezumat scurt: Teză de Doctorat, Universitatea din Petroșani, Facultatea de Mine, 7 p.
- Bărbăcioru, C., **1981**. *Dolj: monografie*, Edit. Sport-Turism, 310 p.
- Bălă, M., **1979**. *Hidrotehnica - Lucrări de construcții* [Hydrotechnique – travaux de construction], Maison d’Edition Didactique et Pedagogique, Bucarest.
- Beaulieu, C., Ouarda, T.B.M.J., Seidou, O., **2010**. Synthèse des techniques d’homogénéisation des séries climatiques et analyse d’applicabilité aux séries de précipitations, *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 52(1), 18 – 37.
- Beaumont, R., **2012**. *An introduction to Principal Component Analysis & Factor Analysis Using SPSS 19 and R (psych package)*, 23 p.
- Beckhoff, B., Kanngießler, B., Langhoff, N., Wedell, R., Wolff, H., **2006**. *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, Springer, ISBN 3-540-28603-9
- Belkin, H.E., Tewalt, S.J., Hower, J.C., Stucker, J.D., O’Keefe, J.M.K., Tatu, C.A., Buia, G., **2010**. Petrography and geochemistry of Oligocene bituminous coal from the Jiu Valley, Petroșani basin (southern Carpathian Mountains), Romania. *International Journal of Coal Geology*, **82**, 68-80.
- Belleau-Arsenault, V., Robert, M., **2014**. *La notion d’espace de liberté des cours d’eau*. *Revue de littérature*. Université du Québec à Rimouski (UQAR), 23 p.
- Belletti, B., Rinaldi, B., Bujise, M., Gurnell, A.D., Mosselman, E., **2015**. A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2079 – 2100.
- Belleudy P., **2015**. *Cours d’hydraulique fluviale – L’écoulement fluvial non-permanent*, 27 p.
- Belleudy, P., Lefort, Ph., **2001**. La continuité du transport solide et sa rupture. *La Houille Blanche*, n° 8/2001, pp. 29-34 - Colloque de la Société Hydrotechnique de France - "La gestion des sédiments: de la source à la mer " Lyon 28-29, Mars 2001.
- Ben-Daoud, M., Moumen, A., El Bouhaddioui, M., Britel, K., Amar, M., Aghoutane, B., **2016**. *Reussir votre projet de recherche. Motivation, Methodologie et guide pratique*, Rabat, 76 p.
- Bennet, R.J., Chorley, R.J., **1978**. *Environmental Systems: Philosophy, Analysis, and Control*, William Clowes & Sons, London
- Bennett, J.P., **1974**. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10(3): 485 – 492.
- Berghes, A.I., **2015**. *Eco-reabilitarea suprafețelor antropice post-exploatare în bazinul carbonifer Valea Jiului*. Rezumat scurt: Teză de Doctorat, Universitatea din Petroșani, Facultatea de Mine, 6 p.
- Bergström, S., **1995**. The HBV model. Singh, V.P. (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, CO, 443-476.
- Bertin, E. P., **1970**. *Principles and Practice of X-ray Spectrometric Analysis*, Kluwer Academic / Plenum Publishers, ISBN 0-306-30809-6
- Beșleagă, N., **1972**, *Elemente de meteorologie dinamică*, Institutul de Meteorologie și Hidrologie, București, 233 p.

- Bhattacharya, B., Solomatine, D.P., **2000**. Application of artificial neural network in stage discharge relationship, *Proc. Of 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydroinformatics, Iowa, USA*
- Bhowmik, A. K., Metz, M., Schäfer, R. B., **2015**. An automated, objective and open source tool for stream threshold selection and upstream riparian corridor delineation. *Environmental Modelling & Software*, 63, 240 – 250.
- Bhowmik, A. K., Schäfer, R. B., Metz, M., **2014**. Reproducible, Automated an Objective Stream Threshold Selection and Upstream Riparian Corridor Delineation from Digital Elevation Models. *Proceedings of the Fifth International Conference on Computing for Geospatial Research and Application*, 43 – 46. doi: 10.1109/COM.Geo.2014.17
- Bidorn, B., Kish, S.A., Donoghue, J.E., Bidorn, K., Mama, R., **2016**. Sediment transport characteristic of the Ping River basin, Thailand. *Procedia Engineering*, 154, 557-564.
- Birk, S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A., (van de) Bund, W., Zampoukas, N., Hering, D., **2012**. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 18, 31 – 41.
- Birkeland, P., **1984a**. Holocene soil chronofunctions, Southern Alps, New Zealand. En *Geoderma*, 34(2), 115-134, [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(84\)90017-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(84)90017-X).
- Birkeland, P.W., **1984b**. *Soils and Geomorphology*, New York: Oxford University Press, 372 p.
- Birkinshaw, S.J., Bathurst, J.C., **2006**. Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 750 – 761.
- Bishop, A. W., **1973**. The stability of tips and spoil heaps. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 6(3-4), 335–376. doi:10.1144/gsl.qjeg.1973.006.03.15
- Bîrsan, M., **2012**. *Variabilitatea scurgerii lichide a râurilor din România. Teză de doctorat*, Universitatea București, 166 p.
- Bîrsan, M., Zaharia, L., Chendeș, V., Brănescu, E., **2012**. Recent trends in streamflow in Romania (1976-2005). *Romanian Reports in Physics*, **64**(1), 275-280.
- Bîrsan, M.V., Dumitrescu, A., **2014**. *ROCADA: Romanian daily gridded climatic dataset (1961-2013)*, V1.0. Administratia Nationala de Meteorologie, Bucuresti, Romania, PANGAEA.
- Black, A.R., Rowan, J.S., Duck, R.W., Bragg, O.M., Clelland, B.E., **2005**. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 15, 427–446.
- Blott, S. J., Pye, K., **2001**. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
- Blum, I., **1970**. *Tehnologia combustibililor solizi Cocsificarea carbunilor*, Editura Didactica si pedagogica, Bucurest
- Boengiu, S., **2008**. *Piemontul Bălăciței. Studiu de geografie*. Universitaria Publishing House, Craiova. 191 p.
- Boengiu, S., Enache, C., **2002**. On the Miocene-Pleistocene geological evolution of the extra-Carpathian Oltenia. *Forum Geografic-Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*, 1, 69 – 75.
- Boengiu, S., Török-Oance, M., **2005**. Features of the Relief Fragmentation within the Blahnit Basin. The Piedmont Sector, *Forum Geografic*; Craiova Iss. 4: 32-37.
- Boengiu, S., Vilcea, C., Licurici, M., **2011**. Landslides from the plain sector of the Jiu valley. *Revista de Geomorfologie*, **13**, 75 – 82.
- Boengiu, S., Vlăduț, A., Avram, S., **2009**. The influence of climate on gravitational processes within the Jiu River Valley: G. I.S. applications. *Central European Journal of Geosciences*, 1, 3, 303 – 311. DOI: 10.2478/v10085-009-0025-4
- Boettinger, J.L., **2005**. Alluvium and Alluvial Soils. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 45-49 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123485304000084>
- Bogdan, O., **1999**, *Principalele caracteristici climatice ale Campiei Olteniei*, Com Geogr, III, Edit. Universității din Bucurest.
- Bogdan, O., **2000**, Precipitațiile. Un risc climatic în Subcarpații Getici, *Comunicări Geogr.*, IV , Edit. Universității din Bucurest.
- Bogdan, O., Marinică, I., **2007**. *Hazarde meteo-climatice din zona temperată: factori genetici și vulnerabilitate cu aplicații la România*, Edit. Lucian Blaga, 422 p.

- Bogunovic, I., Pereira, P., Coric, R., **2018**. Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen stocks in a karst polje located in Bosnia and Herzegovina. *Environ Earth Sci* 77: 612. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7801-z>
- Bonta, J.V., **2000**. Impact of coal surface mining and reclamation on suspended sediment in three Ohio Watershed. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 36(4), 869 – 887.
- Bonta, J.V., Amerman, C.R., Harlukwicz, T.J., Dick, W.A., **1997**. Impact of coal surface mining on three Ohio watersheds - surface-water hydrology. *Journal Of The American Water Resources Association*, 33(4), 907-917
- Borrelli, P., Märker, M., Panagos, P., Schütt, B., **2014**. Modeling soil erosion and river sediment yield for an intermountain drainage basin of the Central Apennines, Italy. *Catena*, 114, 45–58.
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., **2008**. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, 75(3), 268–277
- Bossard, M., Feranec, J., Otahel, J., **2000**. CORINE land cover technical guide - Addendum 2000, *European Environment Agency*, pp. 105.
- Bøtter-Jensen, L., McKeever, S.W.S., Wintle, A.G., **2003**. *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*. Elsevier Science, The Netherlands. 374 p. **ISBN**: 9780444506849
- Bouchard, J., **2016**. *Les suivis des opérations de restauration hydromorphologiques*. 22ème journée Rivières, ONEMA, PPT presentation, 24 p.
- Bourdin, L., Stroffek, S., Bouni, C., Narcy, J.B., Dufour, M., **2011**. *Restauration hydromorphologique et territoires. Concevoir pour négocier*. Cuide technique SDAGE, 108 p.
- Bracken L.J., Turnbull, L., Wainwright, J., Bogaart, P., **2014**. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales, *Earth surface processes and landforms*, 40(2), 177-188 [https://www.researchgate.net/publication/264428020\\_Sediment\\_connectivity\\_A\\_framework\\_for\\_understanding\\_g\\_sediment\\_transfer\\_at\\_multiple\\_scales](https://www.researchgate.net/publication/264428020_Sediment_connectivity_A_framework_for_understanding_g_sediment_transfer_at_multiple_scales), DOI: 10.1002/esp.3635, dernier accès le 14.10.2019
- Bracken, L. J., Croke, J., **2007**. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21, 1749 - 1763.
- Bracken, L.J., Wainwright, J., Ali, G.A., Tetzlaff, D., Smith, M.W., Reaney, S.M., Roy, A.G., **2013**. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 119, 17–34.
- Braghină, C., Drăghici, C., Peptenatu, D., Pintilii, R., **2008**. Rural changes in restructuring mining areas within Gorj County. *The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series*, 8, 1-10.
- Brambilla, D., Longoni, L., Papini, M., **2015**. Modeling erosion and landslides as sediment sources to assess dam siltation. *Proceedings of Slope*, 7 p.
- Brana, V., **1958**. *Zăcămintele nemetalifere din România*. Edit. Științifică, București, 261 p.
- Brașovan, A.,G., **2012**. *Impactul ambiental și reabilitarea haldelor de steril din sectorul superior vestic al Bazinului Petroșani (de la Aninoasa până la Câmpul lui Neag)*, Resume de these de doctorat, Universitatea Babeș Bolyai, Cluj Napoca, 31 p.
- Braudeau, **1951**. Quelques techniques pour l'étude et la mesure du débit solide, *La Houille Blanche*, No. special A/1951 disponible a <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1951/01/lhb1951002.pdf>
- Braul, I., Desrosiers, J., Watson, M., **2011**. An Analysis of Downstream Changes in Temperature, Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids of the Illecillewaet River and Asulkan Brook. *Glacier National Park, B.C. Geog 477 Research Report*.
- Bravard, J., Amoros, C., Pautou, G., Bornette, G., Bournaud, M., Creuzé des Châtelliers, M., Gibert, J., Peiry, J., Perrin, J., Tachet, H., **1997**. River incision in south-east France: morphological phenomena and ecological effects. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 13: 75-90, doi:10.1002/(SICI)1099-1646(199701)13:1<75::AID-RRR444>3.0.CO;2-6
- Bravard, J.P., **1994**. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Revue de géographie de Lyon*, 69(1), Enfoncement des lits fluviaux : processus naturels et impacts des activités humaines, 5-10, DOI : <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4231>



- Bravard, J.P., Amoros, C., Pautou, G., **1985**. Impact of Civil Engineering Works on the Successions of Communities in a Fluvial System: A Methodological and Predictive Approach Applied to a Section of the Upper Rhône River, France, en *Oikos*, Vol. 47, No. 1 (Jul., 1986), pp. 92-111, DOI: 10.2307/3565924
- Bravard, J.P., Kondolf, G.M., Piegay, H., **1999**. Environmental effects of incision and mitigation strategies. *Incised River Channels*, Chichester, UK: John Wiley and Sons, 303-341
- Bravard, J.P., Petit, F., **2000**. *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*, Edit. Armand Colin, Paris, 222 p
- Brewer, P.A., Macklin, M.G., Bălteanu, D., Coulthard, T.J., Basarab, D., Howard, A. J., Bird, G., Zaharia, S., Șerban, M., **2003**. *The tailings dam failures in Maramureș county, Romania and their transboundary impacts on the river systems*, 12 p.
- Brierley, G., Fryirs, K., **2000**. River Styles, a Geomorphic Approach to Catchment Characterization: Implications for River Rehabilitation in Bega Catchment, New South Wales, Australia, *Environmental Management* (2000) 25: 661. <https://doi.org/10.1007/s002670010052>
- Brierley, G., Fryirs, K., **2013**. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*, John Wiley & Sons, New York, 416 p.
- Brierley, G., Fryirs, K., Jain, V., **2006**. Landscape connectivity: the geographical basis of geomorphic applications. *Area*, 38.2, 165–174. DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x
- Brigode, P., **2010**. *Modélisation hydrologique en contexte de changement climatique. Incertitudes liées aux paramètres de modèles conceptuels pluie – débit*, Mémoire de Master 2 - Science de l'Univers, Environnement, Ecologie, Paris
- Bristow, P.A., Knox, **1977**. Standardization of test conditions for high performance liquid chromatography columns, *J.H. Chromatographia*, 10, 279. <https://doi.org/10.1007/BF02263001>
- Broeckx, J., Vanmaercke, M., Bălteanu, D., Chendeș, V., Sima, M., Enciu, P., Poesen, J., **2016**. Linking landslide susceptibility to sediment yield at regional scale: application to Romania. *Geomorphology*, 268, 222-232.
- Brookes, A., **1995**. Challenges and objectives for geomorphology in UK river Management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 593-610.
- Brookes, A., Shields, F.D., **1996**. *River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects*, Chichester, U.K.: John Wiley and Sons, 458 p
- Brooks, A.P., Brierley, G.J., **1997**. Geomorphic responses of lower Bega River to catchment disturbance, 1851-1926. *Geomorphology*, 18: 291-304.
- Brown, H.I., **1996**. The methodological roles of theory in science. *The Scientific Nature of Geomorphology*, Chichester, UK: John Wiley and Sons, pp. 3-20.
- Bryant, G., McPhilliamy, S., Childers, H., **2003**. A survey of the water quality of streams in the primary region of mountaintop/valley fill coal mining. *United States Environmental Protection Agency*. Appendix D: Aquatic Technical Studies. În *United States Environmental Protection Agency. Mountaintop mining/valley fills in Appalachia: Draft programmatic environmental impact statement*, 1427 p.
- Bryant, R., Gilvear, D.J., **1999**. Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: river Tay, Scotland. *Geomorphology*, 23: 1-15.
- Buchet, R., Dyneco-Vigies, I., **2013**. *Mise en œuvre de la surveillance pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau dans les départements d'Outre-Mer*. Volet littoral. Rémi Buchet, 135 p.
- Buhrke, V. E., Jenkins, R., Smith, D. K., **1998**. *A Practical Guide for the Preparation of Specimens for XRF and XRD Analysis*, Wiley, ISBN 0-471-19458-1
- Buia, G., Lorint, C., Lupuleac, R., **2013**. Aspects on economic potential of Jiu Valley coals. *Annals of the University of Petroșani, Mining Engineering*, 14, 81-89.
- Buishand, T.A., **1982**. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records, en *Journal of Hydrology*, Volume 58, Issues 1–2, Pages 11-27, ISSN 0022-1694, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90066-X).
- Buliga, S.L., **2009**. *Analiza morfologica a stratelor si a zacamantului de carbune din sectorul Motru-Gilort*, Edit. Scrisul Românesc, Craiova, 226p.
- Burke, R.A., Fritz, K.M., Barton, C.D., Johnson, B.R., Fulton, S., Hadry, D., Word, D.A., Jack, J.D., **2014**. Impacts of Mountaintop Removal and Valley Fill Coal Mining on C and N Processing in Terrestrial Soils and Headwater Streams. *Water, Air, & Soil Pollution*, 17 p.

- Burt, T., Allison, R., **2010**, *Sediment Cascades. An integrated approach*. Wiley – Blackwell, 484 p. ISBN-13: 978-0470849620
- Busuioc, A., Caian, M., Cheval, S., Bojariu, R., Boroneanț, C., Baci, M., Dumitrescu, A., **2010**. *Variabilitatea și schimbarea climei în România*, Edit. Pro-Universitaria, 226 p.
- Caine, N., Swanson, F.J., **1989**. Geomorphic coupling of hillslope and channel systems in two small mountain basins. *Z. Geomorphol.* 33, 189–203.
- Carrier, S.J., **1966**. A note on the formation of alluvial fans, New Zealand. *Journal of Geology and Geophysics*, 9:1-2, 91-94, DOI: 10.1080/00288306.1966.10420197
- Caruso, B.S., **2015**. A hydrologic connectivity index for jurisdictional analysis of headwater streams in a montane watershed. *Environmental Monitoring Assessment*, 187: 635, 23 p.
- Casella, G., Berger, R. L., **2001**. *Statistical inference*. 2nd Ed. Duxbury Press.
- Catan-Rusta, Z., **1991**. *Bazinul carbonifer Motru-Rovinari: studiu de geografie umană și economică*, Teză de doctorat, Facultatea de Geografie, Universitatea București.
- Catrina, E., Chipurici, N., Ciobanu, P., **1981**. *Mehedinți: monografie*, Edit. Sport-Turism, București, 279 p.
- Cavalli, M., Crema, S., Blok, M., Comiti, F., Marchi, L., Keesstra, S.D., **2016a**. Integrating structural and functional connectivity to characterize sediment dynamics in a small Alpine catchment. *Geophysical Research Abstracts*. Presented at the EGU General Assembly 2016, p. 15034.
- Cavalli, M., Crema, S., Marchi, L., **2014**. *Guidelines on the Sediment Connectivity stand-alone application SedInConnect. Version 2.0 et 2.1*, CNR-IRPI Padova (PP4), 22 p.
- Cavalli, M., Goldin, B., Comiti, F., Brardinoni, F., Marchi, L., **2017**. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. *Geomorphology*, 291, 4-16
- Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L., Dalla Fontana, G., **2008**. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *CATENA*, 73, 249–260. doi: 10.1016/j.catena.2007.11.001
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., **2013**. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology, Sediment sources, source-to-sink fluxes and sedimentary budgets*, 188, 31–41.
- Cavalli, M., Vericat, D., Pereira, P., **2019**. Mapping water and sediment connectivity, *Science of The Total Environment*, 673(10), 763-767 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719315906>, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.071>
- Călin, A., Tatu, G., Belkin, H. E., Tewalt, S.J., Hower, J.C., Stucker, J.D., Jennifer O'Keefe, M.K., **2010**. Petrography and geochemistry of Oligocene bituminous coal from the Jiu Valley, Petroșani basin (southern Carpathian Mountains), Romania. *International Journal of Coal Geology*, 82 (2010), 68–80.
- Călin, D., **1988**, *Observații geomorfologice în unele perimetre afectate de degradări de teren din Munții Parâng-Căpățâni*, Terra, XX(XL), 2.
- Călinoiu, I., Călinoiu, M., Pecingină, I.R., **2010**. Assesment of the Impact of Anthropogenic Pressures Attributes on Jiu River Basin Water. *Annales de l'Université "Constantin Brâncuși" de Târgu Jiu, Série Ingénierie*, 3, p. 416 – 425.
- Cărbureanu, M., **2010**. A factor analysis method applied in development field. *Analele Universității "Constantin Brâncuși" din Târgu Jiu, Economic Series*, 1, 187-194.
- Cârțină, D., **2013**. Aspects regarding the monitoring of the nutrient regime of Jiu river, on Gorj county territory, *Annales de l'Université "Constantin Brâncuși" din Târgu-Jiu, série Ingénierie*, 3, 2013
- Chakrapani, G.J., **2005**. Factors controlling variations in river sediment loads, *Current Science*, 88(4), 569-575
- Chandesris, A., Malavoi, J.R., Souchon, Y., Wasson, J.-B., Pella, H., **2007**. *Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau. Principe et méthodes*. Version provisoire v.3.1, Cemagref, 64 p.
- Chandrasekaran, S., Muttill, N., **2005**. Discharge Rating Curve Extension – A New Approach. *Water Resources Management*. 19. 505-520. 10.1007/s11269-005-6811-2.
- Chapuis, M., **2012**. *Mobilite des sediments fluviaux grossiers dans les systemes fortement anthropises: elements pour la gestion de la basse vallee de la Durance*. These de doctorat, Universite Aix-Marseille, Marseille
- Charlton, R., **2007**. *Fundamentals of fluvial geomorphology*, Taylor & Francis e-Library, 234 p.

- Chen, **2001**. *Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity*, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2), disponible a - <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0493%282001%29129%3C0569%3ACAALSH%3E2.0.CO%3B2>
- Chen, D., Leon, A. S., Gibson, N. L., Hosseini, P., **2016**. Dimension reduction of decision variables for multireservoir operation: A spectral optimization model, *Water Resour. Res.*, 52, 36– 51, doi:10.1002/2015WR017756.
- Chen, G., Wang, Y., Bai, T., Du, H., **2016**. Diagnoses of runoff-sediment relationship based on variable diagnostic method-variable step length sliding correlation coefficient method in Ning-Meng reach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15909 – 15918, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.141
- Chendeş, V., **2007**. *Scurgerea lichidă și solidă în Subcarpații de la curbură*. Rezumat-These doctorale . IGAR
- Chendeş, V., **2011**. *Resursele de apă din Subcarpații de la curbură. Evaluări geospațiale*, Edit. de l'Academie Roumaine, București, 339 p.
- Chendeş, V., Petrea, M., Petrescu, L., Apostu, D.A., Neculau, G., Teodor, S., Pașoi, I., **2017**. *Îndrumar pentru prelucrarea datelor hidrometrice. Volumul I: Îndrumar pentru prelucrarea datelor de la stațiile hidrometrice pe râuri*, Edit. INHGA, 265 p.
- Cheval, S., **2003**, *Indicele Standardizat de Precipitații*. En Cheval S (coord.) Indici și metode cantitative în climatologie, Edit. Universității din Oradea, Oradea.
- Chien, N.X., Khai, P.N., Hien, T.D., Nguyen, D., Bot, D.C., Trung, T.V., Cuc, N.T., Minh, H., Thuc, N.V., Ngan, B.T., Thuan, D.V. , **2006**. The determination of rare earth elements in geological and environmental samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. *VAEC – Annual report*, 9 p.
- Chiș (Bлага), I., **2013**. *Efectul precipitațiilor asupra morfodinamicii spațiului montan și deluros din județul Cluj*, Teză de doctorat (Rezumat), Univetsitatea Babeș Bolyai, Facultatea de Geografie, 49 p.
- Chorley, R. J., Kennedy, B. A., **1971**. *Physical geography; A systems approach*. Prentice-Hall, New York, 370 p.
- Chow, V.T., **1964**. *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, Inc., USA, 1468 p.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. Mays, L.W., **1981**. *Applied Hydrology*, Edit. McGraw Hill, New York, USA
- Christiansen, C., Blaesild, R., Dalsgaard, K., **1984**, Re-interpreting 'segmented' grain size curves. *Geological Magazine*, **121**, 47-51
- Church, M., **1978**. Paleohydrological reconstructions from a Holocene valley fill. Miall, A.D., *Fluvial Sedimentology*, Canadian Society of Petroleum Geologists, 743-772.
- Cineti, A., **1990**. *Resursele de ape subterane ale României*, Edit. Tehnică, București, 396 p
- Ciulache, S., **2004**. *Meteorologie și Climatologie*, Edit. Universitară București, 471 p.
- Ciulache, S., Ionac, N., **1995**. *Meteorologie grafică (vol.1)*, Edit. de l'Universite de Bucarest, 270 p.
- Cîrțână, D., **2013**. Aspects regarding the monitoring of the nutrient regime of Jiu River, on Gorj County Territory, *Annals of the „Constantin Brancusi” University of Târgu Jiu*, Engineering Series, 3, 78 – 82.
- Cîrțină, D., Căpăiță, C., **2007**. Aspecte privind calitatea apelor de suprafață și a apelor subterane din județul Gorj. *Analele Universității “Constantin Brâncuși” din Târgu Jiu*, Serie Inginerie, Nr. 1/2007, 119 – 124.
- Clarke, E.J., Barton, B.A., **2000**. Entropy and MDL Discretization of Continuous Variables for Bayesian Belief Networks. *International Journal Of Intelligent Systems*, **15**, 61-92
- Clarke, R.T., **1999**. Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve
- Clarke, R.T., Mendiondo, E.M., Brusa, L.C., **2000**. Uncertainties in mean discharges from
- Coleman, S. E., Nikora, V. I., Aberle, J., **2011**. Interpretation of alluvial beds through bed-elevation distribution moments, *Water Resour. Res.*, 47, W11505, doi:10.1029/2011WR010672.
- Collard, S., Juvigné, E., Marion, J.M., Mottequin, B., Petit, F., **2012**. *L'origine des mégalithes du Fond de Quarreux (Ardenne, Belgique)*, 33-51.
- Collectif, **2009**. *Projet de restauration et d'entretien des cours d'eau morbihannais : convention départementale type pour la réalisation de l'étude préalable*. ODEM - Conseil Général du Morbihan, 172 p
- Collet, P., Spinelli, D., Lardon, L., Helias, A., Steyer, J.P., Bernard, O., **2014**. *Life-Cycle Assessment of Microalgal-Based Biofuels*. Chapitre en Biofuels from Algae (384 p), Pandey et al. Editor, Elsevier, 287 – 312. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59558-4.00013-9>

- Collier, C.G., Hardaker, P.J., **1996**. Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach. *Journal of Hydrology*, 183(3–4), 277–306, ISSN 0022-1694, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02953-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02953-2).
- Collins, A.L., Walling, D.E., **2004**. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography*, 28,2, 159–196
- Constantin, D., Camenita, A., Panaiotu, C., Necula, C., Codrea, V., Timar-Gabor, A., **2015**. Fine and coarse-quartz SAR-OSL dating of Last Glacial loess in Southern Romania. *Quaternary International*, 357, 33–43. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.07.052
- Constantin, D., Timar-Gabor, A., Veres, D., Begy, R., Cosma, C., **2012**. SAR-OSL dating of quartz of different grain sizes extracted from a loess section in southern Romania embedding the Cămpian Ignimbrite/Y5 tephra layer, *Quaternary Geochronology*, 10, 81–86. DOI: [10.1016/j.quageo.2012.01.012](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2012.01.012)
- Constantin, D.M., Cofas, E., Zaharia, I., **2015**. General aspects concerning the climate of the Oltenia region. case study: the Olt county. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 15(2)
- Constantin, F., Constantinescu, B., **2016**. *Aurul aluvionar din România: sursele și importanța geologo-arheologică*, 27 p.
- Constantin, S., Marinescu, I., **2006**. Evoluția scurgerii medii sezoniere pe râul Jiu în perioada multianuală, p. 257–263. Tomul XLIX – L, 2002–2003
- Constantinescu, P. G.H., **1958**. Studii hidrogeologice pentru alimentarea cu apă potabilă a orașului Craiova. *Hidrotehnica*, no. 3, Bucharest;
- Cooper, R.J., Pedentchouk, N., Hiscock, K.M., Disle, P., Jrueger, T., Rawlins, B.G., **2015**. Apportioning sources of organic matter in streambed sediments: An integrated molecular and compound-specific stable isotope approach, *Science of the Total Environment*, **520**. 187–197
- Corbet, Don M., **1943**. *Stream-gaging procedure, a manual describing methods and practices of the Geological Survey*, Water-Supply Paper 888, U. S. Geological Survey
- Corbuș, C., **2010**. Programul CAVIS pentru determinarea caracteristicilor undelor de viitură singulare. Institutul Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor - Conferința Științifică Jubiliară – „Hidrologia și gospodărirea apelor - Provocări 2025 pentru dezvoltarea durabilă a resurselor de apă”, 28–30 septembrie, Bucurest, 116–123.
- Cordier, S. Lauer, T., Harmand, D., Frechen, M., Brkojewitch, G., **2012**. Fluvial response to climatic and anthropogenic forcing in the Moselle drainage basin (NE France) during historical periods: evidence from OSL dating. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37. DOI: 10.1002/esp.3236
- Cordier, S., **2010**. Optically stimulated luminescence dating: procedures and applications to geomorphological research in France. *Géo-morphologie: Relief, Processus, Environnement*, 16(1), 21–40.
- Corici, S., **2004**. *Studii de ingineria mediului în bazinul hidrografic Jiu privind degradările produse de activitățile miniere și energetice*: these doctorale/ ing. Corici Sorin; cond. șt.: prof. univ. dr. Florin Mărăcineanu. - București: Universitatea de Științe Agricole și Medicină VeterinarăBucurești.
- Cossart, E., Viel, V., Lissak, C., Reulier, R., Fressard, M., Delahaye, D., **2018**. How might sediment connectivity change in space and time? *Land Degradation and Development* 29(8), 2595–2613.
- Costa, J.E., **1983**. Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 986–1004.
- Costin, R.A., **2012**. The impact of mining activity on natural environment and its consequences on planning of Petroșani Depression territory. Case study: the impact on soil. *Geographica Timisiensis*, 31–43.
- Coteș, P., **1957**. *Câmpia Olteniei. Studiul geomorfologic (cu privire specială asupra cuaternarului)*. Edit. Științifică, București, 271 p.
- Couceiro, M.A., Schettini, C.A., **2010**. Assessment of the suspended sediment dynamics of the Araranguá river estuary (SC): Possible effects of acid drainage from the coal mining activity. *Geosciencias*, Sao Paulo, 251–266.
- Coutaz, J., **2016**. *Fine Sediment Dynamics. An experimental study on mountainous cohesive sediment*, University Grenoble Alpes, Thesis Master 2 Eau Climat Environnement, 27 p.
- Couvert, B., Lefort, P., Peiry, J.-L., Belleudy, P., **1999**. *La gestion des rivières. Transport solide et atterrissements*. Guide méthodologique, Agences de l'Eau, 97 p.

- Cozma, E., Onica, I., Goldan, T., Stark, A., **2010**. The dynamics of production capacity for the Jiu Valley mines. *Annals of the University of Petroșani, Mining Engineering*, 11, 14-21.
- Crema, S., Cavalli, M., **2017**. SedInConnect: A stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity, *Computers and Geosciences* doi: 10.1016/j.cageo.2017.10.009
- Crema, S., Cavalli, M., **2018**. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity, *Computers & Geosciences*, Volume 111, 2018, 39-45, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>.
- Crema, S., Schenato, L., Goldin, B., Marchi, L., Cavalli, M., **2015**. Toward the development of a stand-alone application for the assessment of sediment connectivity. *Rendiconti Online Della Soc. Geol. Ital.*, 34, 58–61. doi:10.3301/ROL.2015.37
- Crozier, M.J., Glade, T., **2005**. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (coord.) *Landslide risk assessment*, John Wiley, 1-40.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., **1996**. *Landslide types and processes*. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides investigation and mitigation*. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36–75, <http://worldcat.org/isbn/030906208X>.
- Cucu, V., Cucu, A., **1980**. *Județul Mehedinți*, Edit. de l'Academie de la Republique Socialiste Roumaine, Bucarest, 207 p.
- Cuculici, R., **2015**. *Sistem geografic informational pentru evaluarea dinamicii reliefului în bazinul carbonifer Motru-Rovinari*, Edit. de l'Université de Bucarest, 196 p.
- Cullingford, R. A., Davidson, D. A., Lewin, J., **1980**. *Timescales in geomorphology*. John Wiley and Sons, New York, 360 p.
- Cunningham, A.C., Wallinga, J., **2012**. Realizing the potential of fluvial archives using robust OSL chronologies. *Quaternary Geochronology*, 12, 98 – 106. DOI: 10.1016/j.quageo.2012.05.007
- Daggupati, P., Douglas-Mankin, K.R., Sheshukov, A.Y., Barnes, P., **2010**. *Monitoring and Estimating Ephemeral Gully Erosion using Field Measurements and GIS*, An ASABE Meeting Presentation, 15 p.
- Dany, A., **2016**. *Accompagner la politique de restauration physique des cours d'eau: éléments de connaissance*. Collection «eau & connaissance». Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 304 p.
- Darboux, F., **2014**. *Modeling of connectivity: What for?*, Presentare COST Connecteur, Wageningen, August 26, 14 p.
- Daubert, A., **1964** Quelques aspects de la propagation des crues. *La Houille Blanche*, 3, 341 – 346
- Davis, C.M., Fox, J.F., **2009**. Sediment Fingerprinting: Review of the Method and Future Improvements for Allocating Nonpoint Source Pollution. *Journal of Environmental Engineering*, 135(7), 490-504.
- Davis, W.M., **1899**. The geological cycle. *Geographical Journal*, 14, 481-504.
- Day, D. G., **1983**. *Drainage Density Variability and Drainage Basin Output*, dernier acces le 14.10.2019, [https://www.jstor.org/stable/43944508?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/43944508?seq=1#page_scan_tab_contents)
- De Martonne, E., **1901**. Fjords, cirques, valles alpines et lacs subalpins, *Ann. geogr.*52, 289e294
- De Vente, B., Poesen, J., Arabkhedri, M., Verstraeten, G., **2007**. The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*, 31 (2), 155 - 178. DOI: 10.1177/0309133307076485
- De Vente, J., Poesen, J., **2005**. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models, *Earth-Science Reviews* 71, 95–125, DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.02.002
- Debret, M., Sebag, D., Desmet, M., Balsam, W., Copard, Y., Mourier, B., Susperregui, A.S., Arnaud, F., Bentaleb, I., Chapron, E., Lalien Verger, E., Winiarski, T., **2011**. Spectrocolorimetric interpretation of sedimentary dynamics: the new “Q7/4 diagram”. *Earth Scientific Reviews*, 109, 1–19
- Degoutte, G., **2012**. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières*. (2° Éd.) Hydraulique et morphologie fluviales appliquées, Editeur : Tec & Doc Lavoisier, ISBN-10: 2743014695, 542 p.
- Degoutte, G., **2014a**. *Hydraulique fluviale, chapitre 1: Traité d'hydraulique à surface libre*, 44 p
- Degoutte, G., **2014b**. *Hydraulique fluviale, chapitre 2: Transport solide en hydraulique fluviale*, 26 p
- Degoutte, G., **2014c**. *Hydraulique fluviale, chapitre 3: Formes naturelles des rivières; Ripisylve; Evolution des berges*, 26 p
- Degoutte, G., **2014d**. *Hydraulique fluviale, chapitre 4: Evolution morphologique des rivières aménagées*, 20 p degoutte4



- Delmas, M., Cerdan, O., Mouchel, J.-M., Garcin, M., **2009**. A method for developing a large-scale sediment yield index for European river basins. *Soils Sediments*, 9, 613-626
- Demeter, T., **2009**. *Pedologie generală*, Edit. Credis, Bucarest, 174 p
- Descroix, **2016**. *Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions: la Sénégambie et le Bassin du Niger Moyen*, dernier accès le 14.10.2019, <https://www.researchgate.net/publication/297758927> Evolution recente de la pluviometrie en Afrique de l'ouest a travers deux regions la Senegambie et le Bassin du Niger Moyen, DOI: 10.4267/climatologie.1105
- Desmet, M., Roux, G., Persat, H., Lefevre, I., Bonte, P., Bravard, J.-P., Van Metre, P., Mahler, B., Roy, A., Babut, M., **2009**. *Dynamique fluviale, flux sedimentaires et impact anthropique sur le Rhone: histoire des aménagements et des contaminants metalliques/ organiques*. Livre des resumsés, Publ. ASF, **64**, 1p.
- DeZuane, J., **1997**. *Handbook of Drinking Water Quality*, 2nd edition, John Wiley and Sons Inc., New York
- Dhivert, E., Grosbois, C., Coyne, A., Lefevre, I., Desmet, M., **2014**. Influences of major flood sediment inputs on sedimentary and geochemical signals archived in a reservoir core (Upper Loire Basin, France). *Catena*, **126**, 72-85.
- Diaconu, C., **1962**. Despre stabilitatea albiilor râurilor în RPR în ultimii 30-40 de ani. *Studii de hidrologie*, II, ISCH, București
- Diaconu, C., **1964**. Rezultate noi în studiul scurgerii de aluviuni în suspensie a râurilor R.P.R., en *Studii de hidrologie*, No. XI, pp. 81-223, ISSN 0378-9810
- Diaconu, C., **1969**. Résultats de l'étude de l'écoulement des alluvions en suspension des rivières de la Roumanie. *Hydrological Sciences Journal*, **14(3)**, 51-89, DOI:10.1080/02626666909493735
- Diaconu, C., **1971**. Probleme ale scurgerii de aluviuni pe râurile României, *Studii de hidrologie*, XXXI, București, 307p.
- Diaconu, C., **1971**. *Râurile României – monografie hidrologică*, Institut de Meteorologie et Hidrologie, Bucarest.
- Diaconu, C., **1988**. *Râurile, de la inundații la secetă*, Editura Tehnică, București, 128p.
- Diaconu, C., Avădanei, A., Ciobanu, S., Motea, I., **1962**. Despre stabilitatea albiilor râurilor R.P.R. în ultimii 30-40 ani, *Studii de hidrologie*, No. III, pp. 53 – 63, ISSN 0378-9810
- Diaconu, C., Georgescu, N., Mustață, L., **1961**. În problema duratei totale a viiturilor. *Studii de hidrologie*, I, București, 53 - 62.
- Diaconu, C., Lăzărescu D., Mociornița, C., **1972**. *Aspecte hidrologice ale viiturilor pe unele râuri interioare, din primăvara anului 1970*, Simpozionul Cauze si efecte ale apelor mari din mai-iunie 1970, Bucarest
- Diaconu, C., Șerban, P., **1994**. *Sinteze și regionalizări hidrologice*, Editura Tehnică, Bucarest, 388p.
- Diaz Mendoza, C., **2011**. Alternatives for erosion control by using conventional coverage, non-conventional coverage and revegetation. *Ing. Inv.*, Volume 31, Issue 3, p. 80-90, 2011. eISSN 2248-8723. Print ISSN 0120-5609.
- Dickey, D.A., Wayne, A. F., **1979**. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root, *Journal of the American Statistical Association*, 74:366a, 427-431, DOI: 10.1080/01621459.1979.10482531
- Dietrich, W. E., Bellugi, D. G., Sklar, L. S., Stock, J. D., Heimsath, A. M., Roering, J. J., **2003**. Geomorphic Transport Laws for Predicting Landscape form and Dynamics. *Prediction in Geomorphology* (eds P. R. Wilcock and R. M. Iverson). doi:10.1029/135GM09
- Dietrich, W.E., Dunne, T., **1978**. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplement Band*, 29, 191-206.
- Dietrich, W.E., Dunne, T., Humphrey, F.N., Reid, M.L., **1982**. Construction of sediment budgets for drainage basins, sediment budgets and routing in forested drainage basins. *General Technical Report PNW – 141*, Departamentul pentru Agricultură al Statelor Unite ale Americii
- Dingman, S.L., **2002**. *Physical hydrology*. Second Edition, Prentice Hall, New Jersey
- Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, 32000L0060, adoptée le 23 octobre 2000, JO du 22 décembre 2000, p. 1-73
- Directive 2007/60/CE du 23/10/07 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation » [archive], sur EUR-Lex.

- Ditzler, C., Scheffe, K., Monger, H.C. (eds.), **2017**. *Soil survey manual*, USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Douglas, G.C., Bronk, D.A., Mulhollan, M.R., Carpenter, E.J. 2008. Nitrogen in the Marine Environment, Elsevier, 1757 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372522-6.X0001-1>
- Downs, P., Kondolf, **2002**. Post-Project Appraisals in Adaptive Management of River Channel Restoration, G. *Environmental Management* (2002) 29: 477. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0035-X>
- Drăghici, A.N., **2006**. Poluarea din Valea Jiului și efectele acesteia. *Buletinul AGIR*, **3**, 49-52.
- Drobot, R., **1996**. *Bazele statistice ale hidrologiei*. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 187 p.
- Duffus, J.H., **2002**. 'Heavy metals'—A meaningless term?", *Pure and Applied Chemistry*, vol. 74, no. 5, pp. 793–807, [doi:10.1351/pac200274050793](https://doi.org/10.1351/pac200274050793).
- Duller, G.A.T., **2004**. Luminescence dating of Quaternary sediments: recent advances. *Journal of Quaternary Science*, **19**, 183 - 192. DOI: [10.1002/jqs.809](https://doi.org/10.1002/jqs.809)
- Duller, G.A.T., **2008**, *Luminescence Dating: Guidelines on using luminescence dating in archaeology*. Swindon, English Heritage, 44 p.
- Dumas, D., **2004**. Optimisation de la quantification des flux de matière en suspension, d'un cours d'eau alpin : l'Isère à Grenoble (France), *C. R. Geoscience*, **336**, 1149–1159.
- Dumitrașcu, M., **2006**, *Les modifications du paysage dans la Plaine de l'Olténie*, Edit. Universitara, Bucarest, 229 p.
- Dumitrașcu, M., **2010**. Methods for drought and floods forecast in Jiu catchment, *Buletinul Științific al Universității "POLITEHNICA" din Timișoara, Seria HIDROTEHNICA*, Tom 55(69), Fascicola 2, 97 – 102.
- Dumitrașcu, M., Grigorescu, I., Cuculici, R., Dumitrașcu, C., Năstase, M., Geacu, S., **2014**. Assessing long-term changes in forest cover in the South West Development Region, Romania, *Forum geographic. Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*, **13**(1), 76-85.
- Dumitrașcu, M., Grigorescu, I., Năstase, M., Dragota, C., Kucsicsa, G., **2019**. The Main Environmental Driving Forces of the Invasive Plant Species in the Romanian Protected Areas.
- Dumitrescu, A., Bîrsan, M.V., **2015**. ROCADA: a gridded daily climatic dataset over Romania (1961–2013) for nine meteorological variables. *Natural Hazards* **78**(2): 1045-1063.
- Dumitriu, D., **2007**, *Sistemul aluviunilor din bazinul râului Trotuș* (Alluvial system in the Trotuș River basin). Edit. Universității, Suceava, 259 p.
- Dumitriu, D., **2017**. *Evenimentele hidrologice ca praguri în evoluția albiilor de râu. Studiu de caz: Râul Trotuș*. Teză de abilitare, Facultatea de Geografie și Geologie, Universitatea A.I.Cuza, Iași, 116 p.
- Dumitriu, D., Obreja, F., **2015**. The temporal variation of suspended sediment transport according to the dominance of suspended sediment sources. Case study: the Trotuș river between 2000 and 2014. *Forum geografic. Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*, **XIV**(2), 101-111.
- Dupieux, N., **2004**. *Elaboration d'un protocole commun de description et de suivi des Annexes Fluviales du programme Loire nature*. Programme Loire nature, mission scientifique, 52 p.
- Durrans, S. R., **1992**. Parameter estimation for the Pearson type 3 distribution using order statistics – Reply. *Journal of Hydrology*, **133**, 215-232.
- Dust, D., Wohl, E., **2012**. Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation, *Geomorphology*, Volumes 139–140, 2012, Pages 109-121, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.008>.
- Dutcă, I., Abrudan, I.V., **2010**. Estimation of forest land-cover change in Romania, between 1990 and 2006, *Bulletin of the Transilvania University of Brașov*, **3**(52), 33-36.
- Duvert, C., Gratiot, N., Anguiano-Valencia, Nemery, J., Mendoza, M. E., Carlon – Allende, T., Prat, C., Esteves, M., **2011**. Baseflow control on sediment flux connectivity: Insights from a nested catchment study in Central Mexico, *Catena*, **87**, 129-140.
- Duvert, C., Gratiot, N., Evrard, O., Navratil, O., Nemery, J., Prat, C., Esteves, M., **2010**. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands, *Geomorphology*, **123**, 243-256.
- EASAC (European Academies Science Advisory Council) **2009**. Ecosystem services and biodiversity in Europe. London: The Royal Society, 79 p.

- Elahcene, O., **2013**. *Etude du transport solide par charriage et suspension dans le bassin versant de l'Oued Bellah* (Tipaza). Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach (Alger), 109 p.
- Enache, C., **1976**. *Geologia și hidrogeologia regiunii dintre Motru și Jiucu privire specială asupra zăcămintului de cărbune*, Teză de doctorat, Facultatea de Geografie, Universite de Bucarest, 26p.
- Enache, C., Popescu, A., **2001**, *Geologia Olteniei și bogățiile subsolului*, Editure SITECH, 108 p.
- Engel, M., Penna, D., Bertoldi, G., Vignoli, G., Tirlir, W., Comiti, F., **2018**. Controls on spatial and temporal variability of streamflow and hydrochemistry in a glacierized catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-2018-135>. Manuscript under review for journal Hydrol. Earth Syst. Sci.
- Engman, E. T., **1986** Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112 (1), 39-53. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:1(39))
- Erktan, A., Legout, C., De Danieli, S., Daumergue, N., Cecillon, L., **2016**. Comparison of infrared spectroscopy and laser granulometry as alternative methods to estimate soil aggregate stability in Mediterranean badlands. *Geoderma*, 271, 225-233.
- Esterby, S.R., **1996**. Review of methods for the detection and estimation of trends with emphasis on water quality applications, *Hydrological Processes* 10:127-149. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199602\)10:2<127::AID-HYP354>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<127::AID-HYP354>3.0.CO;2-8)
- Evans, D., Wade, B., Henenhan, M., Erez, J., Müller, W., **2016**. Revisiting carbonate chemistry controls on planktic foraminifera Mg / Ca: implications for sea surface temperature and hydrology shifts over the Paleocene–Eocene Thermal Maximum and Eocene–Oligocene transition. *Climate of the Past*, 12 (4), 819-835, (doi:10.5194/cp-12-819-2016).
- Evrard, O., Nemery, J., Gratiot, N., Duvert, C., Ayrault, S., Lefevre, I., Poulenard, J., Prat, C., Bonte, C., Esteves, M., **2010**. Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides, *Geomorphology*, 124, 42 - 54.
- Ewen, J., Parkin, G. O'Connell, P.E., **2000**. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modelling System. *Journal Hydrologic Eng.*, 5, 250-258.
- FAO, **2013**. *Forests and Water: International Momentum and Action*, Rome, 84p.
- Fasolato, G., Ronco P., Di Silvio G., **2006**. *Simplified models for simulating morphodynamic processes at different space- and time-scales*. Proceeding of the 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 – Sep 13, Philadelphia, USA.
- Fernand Joly, **1997**. *Glossaire de géomorphologie*, Masson, Armand Colin, Paris, 324 p.
- Feroiu, M., **1998**. *Contribuții la solutionarea problemelor hidrogeologice implicate de optimizarea exploatărilor de lignit din zona Motru*, These de doctorat, Faculte de Geographie, Universite de Bucarest
- Ferro, V., Minacapilli M., **1995**. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrological Sciences Journal*, 40:6, 703-717. <http://dx.doi.org/10.1080/02626669509491460>
- Fiandino, M., Roditis, J.C., **1996**. *Fonctionnement hydro-sédimentaire de petits cours d'eau méditerranéens*. Premiers résultats et éléments pour une gestion physique des lits, en Méditerranée, Année 1996,85, pp. 59-62
- Fiebig, M., Preusser, F., **2007**. Investigating the amount of zeroing in modern sediments of River Danube, Austria. *Quaternary Geochronology*, 2(1–4), 143-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2006.09.001>
- Florea, N., Bălăceanu, V., Răuță, C., Canarache, A., **1987a**, *Metodologia Elaborării Studiilor Pedologice. Partea I. Colectarea și sistematizarea datelor pedologice*, I.C.P.A., Edit. Redacția de Propagandă Tehnică Agricolă, Bucarest 191 p.
- Florea, N., Bălăceanu, V., Răuță, C., Canarache, A., **1987b**, *Metodologia Elaborării Studiilor Pedologice. Partea a II-a. Elaborarea studiilor pedologice în diferite scopuri*, I.C.P.A., Edit. Redacția de Propagandă Tehnică Agricolă, Bucarest 349 p.
- Florea, N., Munteanu, I., **2003**, *Sistemul roman de taxonomie a solurilor*, SRTS, Edit. Estfalia, Bucarest.
- Florescu, G., Hutchinson, S.M., Kern, Z., Mîndrescu, M., Cristea, I.A., Mihăilă, D., Lokas, E., Feurdean, A., **2017**. *Last 1000years of environmental history in Southern Bucovina, Romania: A high resolution multi-proxy lacustrine archive*. PALEO, 60 p.
- Flowerdew, R., Green, M., Kehris, E., **1991**. Using areal interpolation methods in geographic information systems, *Papers in Regional Science*, 70: 303. <https://doi.org/10.1007/BF01434424>

- Fodor, D., **2006**. Influența industriei miniere asupra mediului. In *Buletinul AGIR*, **3**, 2-13.
- Fodor, D., Lazăr, M., **2006**. Ocuparea și reabilitarea ecologică a terenurilor în zona Olteniei. In *Buletinul AGIR*, **3**, 27-31.
- Fodor, D., Vulpe, I., Lazăr, M., **2003**, *Reabilitarea tehnică și tehnologică a carierelor de lignit*, Edit Infomin Deva.
- Folk, R.L., Ward, W.C., **1957**, A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, 3-26. Doi: <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Foltz, R.B., Yanosek, K.,A., Brown, T.M., **2008**. *Sediment concentration and turbidity changes during culvert removals*. *Journal of Environmental Management*, **87**, 329–340.
- Fort M., Arnaud-Fassetta G., Bétard F., Cossart E., Madelin M., Lissak C., Viel V., Bouccara F., Carlier B., Sourdot G., Tassel A., Geai M.-L., Bletterie X., Charnay B., **2015**. Sediment Dynamics and Channel Adjustments Following Torrential Floods in an Upper Alpine Valley (Guil River, Southern French Alps), *Engineering Geology for Society and Territory*, **3**, 313-317.
- Fournier, J., Bonnot-Courtois, C., Paris R., Voldoire, O., Le Vot, M., **2012**. *Analyses granulométriques, principes et méthodes*. CNRS, Dinard, 99 p.
- Fournier-Bidoz V., Garnier-Laplace J., **1994**. Étude bibliographique sur les échanges entre l'eau, les matières en suspension et les sédiments des principaux radionucléides rejetés par les centrales nucléaires, rapport IPSN, SERE 94/073, Cadarache.
- Fovet, O., Ruiz, L., Hrachowitz, M., Fauchoux, M., Gascuel-Oudou, C., **2015**. Hydrological hysteresis and its value for assessing process consistency in catchment conceptual models. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**, 105 – 123, doi: 10.5194/hess-19-105-2015
- Frențiu, T., Ponta, M., Mihaltan, A., Cordos, E., Frențiu, M., Lazăroiu, G., Traista, L., Indries, R., **2009**. Qualitative assessment of heavy metals sources in pitcoal/ biomass briquettes combustion using multivariate statistical analysis. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **11**(5), 697 – 710
- Frunzescu, D., Georgescu, O., Brănoiu, Gh., **2004**. On the silica diagenesis processes of the coal debris from Miocene formation from Prahova County, en *Buletin UPG*, vol. LVI, nr. 1, p. 1-14, Ploiești
- Fryirs, K., **2007**. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades, [https://www.researchgate.net/publication/223586569\\_Buffers\\_barriers\\_and\\_blankets\\_The\\_disconnectivity\\_of\\_catchment-scale\\_sediment\\_cascades](https://www.researchgate.net/publication/223586569_Buffers_barriers_and_blankets_The_disconnectivity_of_catchment-scale_sediment_cascades), DOI: 10.1016/j.catena.2006.07.007, dernier accès le 14.10.2019
- Fryirs, K., **2013**. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. In *Earth Surface Processes and Landforms*, **38**, 30-46.
- Fryirs, K., Brierley, G. J., Preston, N. J. and Kasai, M., **2007a**. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades, *Catena*, **70**, 49-67.
- Fryirs, K., Brierley, G. J., Preston, N. J. and Spencer, J., **2007b**. Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. In *Geomorphology*, **84**, 297-316. doi:10.1016/j.geomorph.2006.01.044
- Gaceu, O., **2002**. *Elemente de meteorologie practică*, Edit. Didactică și pedagogică, București.
- Gallant, J., **2011**. Adaptive smoothing for noisy DEMs. In *Geomorphometry*, 37 – 40.
- Gallo, E.L., Meixner, T., Aoubid, H., Lohse, K.A., Brooks, P.D., **2015**. Combined impact of catchment size, land cover, and precipitation on streamflow and total dissolved nitrogen: A global comparative analysis. In *Global Biogeochemical Cycles*, 1109 - 1121.
- Gallon, R.K., Fournier, J., **2015**. Grain-Size Statistics and Description of Sediment, 11p.
- Galunin, E., Ferreti, J., Zapelini, I., Vieira, I., Teixeira Tarley, C.R., Abrao, T., Santos, M.J., **2013**. Cadmium mobility in sediments and soil from a coal mining area on Tibagi River watershed: Environmental risk assessment. In *Journal of Hazardous Materials*, 1-8.
- Ganjali, M.R., Gupta, V.K., Faridbod, F., Norouzi, P., **2016**. *Lanthanides Series Determination by Various Analytical Methods*. Elsevier Inc., 448 p.
- Gao, B., **1996**. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, **58**, 257 – 266, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).

- Garzanti, E., Andò, S., France-Lanord, C., Vezzoli, G., Censi, P., Galy, V., Najman, Y., **2010**. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 1. Bedload sand (Ganga–Brahmaputra, Bangladesh). În *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 368–381.
- Garzanti, E., Ando, S., Vezzoli, G., Abdel Megid, A.A., Kammar, A.E., **2006**. Petrology of Nile River sands (Ethiopia and Sudan): Sediment budgets and erosion patterns. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(3-4), 327 – 341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.001>
- Gâștescu, P., **2014**. Water resources in the Romanian Carpathians. Genesis, territorial distribution, management. *Proceedings of the 2nd International Conference – Water resources and wetlands*, 13-20.
- Gâștescu, P., Țuchiu, E., **2012**, The Danube river in the lower sector in two hydrological hypostases — high and low waters. *Riscuri și catastrofă*, XI, 165–182
- Geanana, M., **1973**. *Contribuții privind studiul limitei superioare a pădurii în unele masive din Carpații românești*. Annales de l'Universite de Bucarest, Serie Geographie, 1, 4 p.
- Geanana, M., **2004**. *Limita superioara a padurii in Muntii Retezat*. Editura Universitatii din Bucuresti, Bucuresti, Roumanie
- Gericke, O J , du Plessis, J A., **2012**. Catchment parameter analysis in flood hydrology using GIS applications. In *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 54(2), 15-26.
- Germain, A., **2013**. Dynamique des matériaux en suspension (MES) le long de rivières aménagées de montagne: exemple de l'Arc en Maurienne de l'Isère. Thèse de doctorat. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 288p.
- Giakoumis, T., Voulvoulis, N., **2018**. *The Transition of EU Water Policy Towards the Water Framework Directive's Integrated River Basin Management Paradigm*. Environmental Management, Accepted Manuscript, 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1080-z>
- Giardino, J.R., Marston, R.A., **1999**. Changing the Face of the Earth: Engineering Geomorphology. *Geomorphology*, 31(1-4), 1-439.
- Gibbons, J.D., Chakraborti, S., **2003**. Nonparametric Statistical Inference, Marcel Dekker, NY.
- Gilbert, C. H., 1887, DESCRIPTIONS OF NEW AND LITTLE KNOWN ETHEOSTOMOIDS, en PROCEEDINGS OF UNITED STATES NATIONAL MUSEUM, disponible a [https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/11501/1/USNMP-10\\_607\\_1887.pdf](https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/11501/1/USNMP-10_607_1887.pdf)
- Gilbert, R.O., **1987**. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Wiley, NY.
- Gilks, W., Richardson, S., Spiegelhalter, D.J., **1996**. *Markov Chain Monte Carlo in Practice*, Ed. Chapman and Hall, 512 p.
- Gilley, J.E., **2005**. Water-Induced. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 463-469. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00262-9>
- Gilvear, D.J., **1999**. Fluvial geomorphology and river engineering: future roles utilizing a fluvial hydrosystems framework. *Geomorphology*, 31: 229-245.
- Ginocchio, (de) R., Viollet, P.-L., **2012**. L'énergie hydraulique, Editeur: Tec & Doc Lavoisier, 632 p.
- Gob, F., Bilodeau, C., Thommeret, N., Tamisier, V., Albert, M.-B., Belliard, J., 2014. *Vers la construction d'indicateurs hydromorphologiques soutenant la biologie à partir de la base de données nationale CARHYCE*, 107 p.
- Gökgöz, T. Yayla, Y., Yaman, M. B., Güvenç, H., Kaya, S., **2016**. Developing tools for computation of basin topographic parameters in GIS. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII(2), 165-168.
- Goldin, B., **2015**. *Geomorphometric analysis and sediment dynamics in mountainous basins: spatial and temporal scales, te Ph.D. thesis*
- Goldsmith, R. H., **1982**. "Metalloids", *Journal of Chemical Education*, vol. 59, no. 6, pp. 526–527, [doi:10.1021/ed059p526](https://doi.org/10.1021/ed059p526).
- Golosov, V., Collins, A.L., Tang, Q., Zhang, X., Zhou, P., He, X., Wen, A., **2017**. Sediment transfer at different spatial and temporal scales in the Sichuan Hilly Basin, China: Synthesizing data from multiple approaches and preliminary interpretation in the context of climatic and anthropogenic drivers. În *Science of the Total Environment*, 598, 319–329



- Gonzales, T., Garcia de Jalon, D., Roman, M., **2012**. River Restoration in Spain: Theoretical and Practical Approach in the Context of the European Water Framework Directive. *Environmental Management*, 50, 123 – 139.
- Goode, J., Luce, C., Buffington, J., **2012**. Enhanced sediment delivery in a changing climate in semi-arid mountain basins: Implications for water resource management and aquatic habitat in the northern Rocky Mountains, en *Geomorphology*, Volumes 139–140, Pages 1-15, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.021>.
- Goransson, G., Larson, M., Bendz, D., **2013**. *Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system – river Gota Alv, SW Sweden*, HESS, 17, 2529-2542.
- Gorsline, D.S., **2016**. A review of fine-grained sediment origins, characteristics, transport and deposition. *Geological Society Publications*, 17 – 33.
- Goudie, A., **2014**. Alphabetical Glossary of Geomorphology, *International Association of Geomorphologists*, 84 p.
- Gourdin, E., Huon, S., Evrard, O., Ribolzi, O., Bariac, T., Sengtaheuanghoung, O., Ayrault, S., **2015**. Sources and export of particle-borne organic matter during a monsoon flood in a catchment of northern Laos, *Biogeosciences*, 12, 1073–1089
- Graf, W.H., **2000**. *Hydraulique fluviale: écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*, Éditeur PPUR presses polytechniques, ISBN 2880744423, 9782880744427, 627 p.
- Grangeon, T., Legout, C., Esteves, M., Gratiot, N., Navratil, O., **2012**. Variability of the particle size of suspended sediment during highly concentrated flood events in a small mountainous Catchment. In *Journal of Soils Sediments*, 12, 1549–1558.
- Granier, X., Moreau, J., Cognet, L., Pacanowski, R., *Colorimétrie. Radiométrie. Photométrie*, 122p. Disponibil la adresa: <http://www.labri.fr/perso/granier/Cours/IOGS/color/cours1.pdf>
- Graz, Y., Di-Giovanni, C., Copard, Y., Elie, M., Faure, P., Laggun-Défarge, F., Lèveque, J., Michels, R., Olivier, J.E., **2011**. Occurrence of fossil organic matter in modern environments: Optical, geochemical and isotopic evidence, *Applied Geochemistry*, 26, 1302–1314
- Graz, Y., Di-Giovanni, C., Copard, Y., Laggun Défarge, Boussafir, M., Lallier – Verges, E., Baillif, P., Perdereau, L., Simonneau, A., **2010**. Quantitative palynofacies analysis as a new tool to study transfers of fossil organic matter in recent terrestrial environments, *International Journal of Coal Geology*, 84, 49–62
- Graz, Y., Di-Giovanni, C., Copard, Y., Mathys, N., Cras, A., Marc, V., **2012**. Annual fossil organic carbon delivery due to mechanical and chemical weathering of marly badlands areas, *Earth Surface Processes And Landforms*, 37, 1263–1271
- Greco, F., **1992**, *Bazinul Hîrtibaciului, Elemente de morfohidrografie*. Edit. Academiei, Bucurest
- Greco, F., **2009**, *Hazarde și riscuri naturale*. Edit. Universitară, Bucurest
- Greco, F., **2018**. *Geomorfologie dinamica pluvio-fluviala. Teorie si aplicatii*. Editure Universitara, ISBN: 606-28-0727-6, 480 p.
- Greco, F., Osaci-Costache, G., Ioana-Toroimac, G., **2008**, *Dynamics tendency of some minor riverbeds in the Curvature Subcarpathians*. Papier présenté à la 13eme Reunion Geomorphologique Franco-Italienne-Roumaine, Porto Heli, Grece, 18–21 Juin
- Greco, F., Zaharia, L., Ghiță, C., Comănescu, L., Cîrciumaru, E., Albu, M., **2012**, *Sisteme hidrogeomorfologice din Câmpia Română. Hazard – Vulnerabilitate – Risc*. Edit. Universității din Bucurest
- Greco, F., Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., Armaș, I., **2017**. *Floods and Flash-Floods Related to River Channel Dynamics*. Springer International Publishing Switzerland, 10.1007/978-3-319-32589-7\_33.
- Greco, F., Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., Dobre, R., **2007**, Risque météo-hydrologique dans la vallée du Danube roumain. Le cas des inondations d’avril – mai 2006. Ben Boubaker H (ed) *Actes du XXème Colloque de l’Association Internationale de Climatologie*, Tunis-Carthage, 3–8, 277–282
- Gruber, N., Galloway, J.N., **2008**. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451. 293 -296. DOI: 10.1038/nature06592
- Gruber, N., Sarmiento, J.L., **1997**. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles - GLOBAL BIOGEOCHEM CYCLE*. 11. 235-266. DOI: 10.1029/97GB00077.
- Gruescu, I., Grumazescu, C., **1970**. *Județul Hunedoara*, Edit. Academiei Republicii Socialiste România, București, 139 p.

- Guenni, L., Degryze, E., Alvarado, K., **2008**. Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. In *Revista Colombiana de Estadística*, 31(1), 41 – 65.
- Guerra, S., Singh, V., **2013**. Relationship between bedload and suspended sediment in the sand-bed Exu River, in the semiarid region of Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 58(8), 1789-1802, DOI: 10.1080/02626667.2013.839875
- Gumiere, S., Le Bissonnais, Y., Raclot, D., **2009**. Soil resistance to interrill erosion: Model parameterization and sensitivity. *CATENA*. 77. 274-284. 10.1016/j.catena.2009.02.007.
- Gunal, H., Ersahin, S., Yetgin, B., Kutlu, T., **2008**. Use of chromameter measured color parameters in estimating color related soil variables. In *Commun Soil Sci Plan*, 39, 726–740.
- Haberlandt, U., Radtke, I., **2014**. Hydrological model calibration for derived flood frequency analysis using stochastic rainfall and probability distributions of peak flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 353-365.
- Haddachi, A., Ryder, D. S., Evrard, O., Olley, J., **2013**. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research*, 28, 560-578.
- Hahn, D.W., **2009**. Light Scattering Theory. University of Florida, 13 p.
- Haiduc, I., **1940**. *Istoria aurului din Romania*. Imprimeriile “Adeverul” S.A., Bucuresti, 390 p.
- Halim, M.A., Majumder, R.K., Zaman, M.N., Hossain, S., Rasul, M.G., Sasaki, K., **2013**. Mobility and impact of trace metals in Barapukuria coal mining area, Northwest Bangladesh. In *Arabian Journal of Geosciences*, 6(12), 4593-4605.
- Hallair, G., **2019**. Les carnets de terrain du géographe français Emmanuel de Martonne (1873-1955) : méthode géographique, circulation des savoirs et processus de visualisation, Belgeo [En ligne], DOI: 10.4000/belgeo.10807
- Haneș, N., **2006**. Impactul proceselor de extracție și preparare a cărbunelui din Valea Jiului asupra apelor, solului și aerului. In *Buletinul AGIR*, 3, 69-75.
- Harden J., **2014**. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps, en *Biogeosciences*, United States: N. p., 2014. Web. doi:10.5194/bg-11-6573-2014.
- Harisiad, E., Brînzan, N., Mocioi, I., Adam, I., Bădescu, N., Băleanu, C., **1980**. *Gorj: monografie*, Edit. Sport-Turism, București, 230 p.
- Hawkes S. J., **1997**. "What is a "heavy metal"?", *Journal of Chemical Education*, vol. 74, no. 11, p. 1374, doi:10.1021/ed074p137
- Hânțanu, A., Părău, B., **2005**. Efectele poluării asupra râului Jiu. În *Lucrările simpozionului științific studentesc național "Geoecologie și procesarea resurselor minerale" Petroșani*, 66 – 74.
- Heath, R., Moffett, M., Banister, S., **2004**. *Water related impact of small scale mining*, Final Report to the Water Research Commission, 100 p.
- Hebeler, F., Purves, R.S., **2009**. The influence of elevation uncertainty on derivation of topographic indices. In *Geomorphology*, 111 (1), 4–16. DOI:10.1016/j.geomorph.2007.06.026
- Heckmann, T., Schwanghart, W., **2013**. Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment - exploring sediment cascades using graph theory. In *Geomorphology*, 89-103.
- Helsel, D.R., Hirsch, R.M., **2002**. *Statistical Methods in Water Resources*. U.S. Geological Survey.
- Hengl, T., **2006**. Finding the right pixel size. In *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283-1298.
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., van Loon, E.E., **2010**. On the uncertainty of stream networks derived from elevation data: the error propagation approach, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1153–1165.
- Hepelwa A.S., **2014**. Dynamics of Watershed Ecosystem Values and Sustainability: An Integrated Assessment Approach, *International Journal of Ecosystem*, 4(3), pp. 43-52, 2014.
- Hernández, J.G., Boillat, J.L., Jordan, F., Hingray, B., **2009**. La prévision hydrométéorologique sur le bassin versant du Rhône en amont du Léman. *La Houille Blanche*, 5, 61-70.
- Hersch, R.W., **1995**. *Streamflow Measurement*, (2nd Edition), E&FN Spon London, UK.
- Hersch, R.W., **1999**. *Hydrometry: Principles and Practices*, John Wiley and Sons Ltd., New York, NY.
- Hicks, D. M., Gomez, B., **2005**. Sediment Transport, *Tools in Fluvial Geomorphology* (eds G. M. Kondolf and H. Piégay). doi:10.1002/0470868333.ch15

- Higgins, H., **2010**. *Estimation des concentrations de sédiments en suspension dans le fleuve Saint Jean* (Nouveau-Brunswick) et établissement de liens avec les données météorologiques locales. Mémoire de master, Université du Québec INRS – Centre Eau, Terre, Environnement, 134 p.
- Higgins, A., Restrepo, J.C., Ortiz, J.C., Pierini, J., Otero, L., **2016**. Suspended sediment transport in the Magdalena river (Colombia, south America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 41 p.. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.04.003>
- Hingray, B., Picouet, C., Musy, A., **2009**. *Hydrologie, Tome 2: Une science pour l'ingénieur*, Editeur PPUR, 600 p, ISBN: 978-2-88074-798-5
- Hirsch, R.M., **1984**. Non-Parametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*. 20. 727-732. 10.1029/WR020i006p00727.
- Hirsch, R.M., J.R. Slack, and R.A. Smith., **1982**. Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research* 18(1):107-121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>
- Hjulstrom, F., **1935**. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, *Bulletin. Geological Institute Uppsala*, 25, 221-527
- Ho, Ming & Yusof, Fadhilah., **2012**. Homogeneity tests on daily rainfall series in peninsular Malaysia. *International Journal of Contemporary Mathematical Sciences*. 7.
- Höhle, J., Potuckova, M., **2011**. *Assessment of the Quality of Digital Terrain Models*. European Spatial Data Research, Official Publication, 60, 91 p.
- Holeman, J.H., **1968**. The Sediment Yield of Major Rivers the World. *Water Resources Research*, 4(4), 737 – 747.
- Horne, A. J., and Goldman, C. R., **1994**. *Limnology*, 2nd edition. McGraw-Hill, Inc., 576 p.
- Horowitz, A.J., Elrick, K.A., Demas, C.R., Demcheck, D.K., **1991**. The use of sediment-trace element geochemical models for the identification of local fluvial baseline concentrations. În *Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanation (Proceedings of the Vienna Symposium)*, IAHS Publications, **203**, 339-348.
- Horton, R. E., **1945**. Erosional development of streams and their drainage basins: hydro-physical approach to quantitative morphology, *Geological Society of America Bulletin* 56 (3): 275–370
- Horvath, C., **2008**. Analiza SWOT a efectelor lacurilor de acumulare asupra mediului. Model: Amenajarea "Drăgan-Iad" din bazinul superior al Crișului Repede. În *Geographia Napocensis*, Nr. 2, Cluj-Napoca.
- Horvath, E., Jordan, G., Fugedi, U., Bartha, A., Kuti, L., Heltai, G., Kalmar, J., Waldmann, I., Napradean, I., Damian, G., **2009**. Risk assessment of heavy metals in abandoned mine lands as significant contamination problem in Romania. In *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly, 2p.
- Houbrechts, G., Levecq, Y., Vanderheyden, V., Petit, F., **2011**. Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer. *Geomorphology*, 126, 233–244.
- Howard, A., Macklin, M., **1999**. A generic geomorphological approach to archaeological interpretation and prospection in British river valleys: A guide for archaeologists investigating Holocene landscapes. *Antiquity*, 73(281), 527-541. doi:10.1017/S0003598X0006508X
- Hübner R., Astin K. B. & Herbert R. J. H., **2010**. "Heavy metal"—time to move on from semantics to pragmatics?", *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 12, pp. 1511–1514, doi:10.1039/C0EM00056F.
- Hudson-Edwards, K.A., Schell, C., Macklin, M.G., **1999**. Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, southwest Spain, *Applied Geochemistry*, Volume 14, Issue 8, 1999, Pages 1015-1030, ISSN 0883-2927, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00008-6).
- Humphrey, N., Konrad, S., **2000**. River incision or diversion in response to bedrock uplift. *Geology*. 28. 43-46. 10.1130/0091-7613(2000)28<43:RIODIR>2.0.CO;2.
- Hung, O., **2002**. A review of the classification of landslides of the flow type (vol 7, pg 225, 2001). *Environmental and Engineering Geoscience*. 8.
- Hupp, C.R., Osterkamp, W.R. Howard, A.D., **1995**. *Biogeomorphology – Terrestrial and Freshwater Systems*, Amsterdam: Elsevier Science, 347 p.
- Ibisate, A., Ollero, A., Diaz, E., **2011**. Influence of catchment processes on fluvial morphology and river habitats. În *Limnetica*, 30(2): 169-182.
- ICCP, **1998**, The new vitrinite classification (ICCP System 1994), *Fuel*, 77(5), 349-358.

- Ichim I, Rădoane M, Rădoane N, Grasu C, Miclăuș C., **1998**, *Dinamica sedimentelor. Aplicație la râul Putna – Vrancea*. Edit. Tehnică, Bucurest
- Ichim, I, Rădoane, M., **1987**. *Multivariate statistical analysis of sediment yield and prediction in Romania*, disponibile a - <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301408779>
- Ichim, I., Rădoane, M., **1990**, Channel sediment variability along a river: Siret river case study (Romania). *Earth Surface Land Process*, 15, 211–225
- Ichim, I., Rădoane, M., Bătuca, D., Duma, D., **1989**, *Morfologia și dinamica albiilor de râuri*, Edit. Teh., București, 406p
- Ichim, I., Rădoane, M., Rădoane, N., Grasu, C., Cochior, C., **1994**. Bugetul de aluviuni al bazinului râului Oltet, *Lucr. sesiunii științifice anuale 1993*, Institutul de Geografie al Academiei, 139-144.
- Ichim, I., Rădoane, M., Rădoane, N., Grasu, C., Miclăuș, C., **1998**. *Dinamica sedimentelor. Aplicație la râul Putna – Vrancea*. Editura Tehnică, Bucurest, 192 p.
- Ielenicz, M., **1970**, Zonele cu alunecări de teren din țara noastră (Landslides in our country). *Terra*, 2(1),31–40.
- Ielenicz, M., **1984**, *Munții Ciucaș-Buzău. Studiu geomorfologic*. Edit. Academiei Române, Bucurest, 146 p
- Ielenicz, M., **1996**. *Dealurile și Podișurile României*, Edit. de l'Universite "Dimitrie Cantemir", Bucurest, x p.Editura Fundatiei "Romania de Maine" 244 p.
- Ielenicz, M., Nedelea, A., **2009**. *Dicționar de Geomorfologie*. Editura Universitară, București, 406 p.
- Ielenicz, M., Pătru, I., **2005**. *Geografia fizică a României*, Edit. Universitară, București, 255p
- Ielenicz, M., Pătru, I., Ghincea, M., **2003**. *Subcarpații României*, Edit. Universitară, București, 264 p.
- Ilie, I., **1970**. Carstul din nordul Olteniei și câteva probleme de geografie aplicată, AUB-G, XIX, București indefiniton. *Journal of Hydrology*, 222(1-4):185–190, 1999. 11, 15, DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00097-9
- Ioana - Toroimac, G., Dobre, R., Grecu, F., Zaharia, L., **2010**. Human impact on the landscape. *HILS Working Group - International Association of Geomorphologists*, 16(3).
- Ioana -Toroimac, G., **2009**. *La dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Prahova (Roumanie): fonctionnement actuel, évolution récente et conséquences géographiques*. Thèse de doctorat, université Lille 1, 342 p.
- Ioana-Toroimac, G., Dobre, R., Grecu, F., Zaharia, L., **2010**, Évolution 2D de la bande active de la Haute Prahova (Roumanie) durant les 150 dernières années. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 3, 275–286.
- Ion, I.D., **1973**. Resurgențele din zona Tismana-Izvarna. În *Analele Universității din București*, 27 - 40.
- Ionac, N., Ciulache, S., **2008**. *Atlasul bioclimatic al României*, Edit. Ars Docendi, București, 279 p.
- Ionescu, O., Stoiculescu, C.D., **2004**. *Studii privind instituirea parcului Defileului Jiului, Regia Nationala a Padurilor ROMSILVA*, 90 p. - Studiul\_de\_fundamentare\_pndj\_pag1\_90
- Ionescu-Argetoiaia I.P., **1918**. *Pliocenul din Oltenia*, An. Inst. Geol. 8: 261-382. An IG, VIII (1914), București, x p.
- Ionică, M., **2002**. *Surse de poluare a apelor curgătoare din bazinul hidrografic al Văii Jiului*, Referat de doctorat, Petroșani.
- Ionică, M., Traistă, E., Aronel, M., Temelie, C., **2002**. Studiu privind poluarea bazinului superior al râului Jiu. În *Jurnalul Conferinței "Zilele Universității Constantin Brâncuși"*, Târgu Jiu, x p. 8-th International Conference, Târgu Jiu, May 24-26
- Ionuș, O., **2010**. *The assessment of human pressure on surface waters within the Motru catchment area, Oltenia region-Romania*, Proceedings of 6th International Scientific Conference, Global Changes and Regional Development, University of Sofia "St. Kliment Ohridski", 43 – 47
- Ionuș, O., **2011**. *Potențialul geoecologic al apelor de suprafață în bazinul hidrografic Motru*. Teză de doctorat, București, x p.
- Ionuș, O., **2014**. Preliminary data on the Jiu River meanders in the lower course (South-West Romania). În *Forum Geografic*, 13(1), 18-24.
- Ionuș, O., Dobre, M., Ciocan, E., **2014 – 2015**. Assessing flood magnitude and frequency. Case study: 2013 spring floods on the Jiu River. Filiași – Craiova Sector (South – West Romania), *Annals of the University of Craiova, Geography Series*, 16, 20 – 34. Ionuș Dobre Ciocan
- Isaie, H., Soufi, M., **2008**. Classification of Gully Erosion Based on Morphoclimatic and Soil Characteristics in the Northeast of Iran, Golestan province, *Proceedings of the 15th ISCO Conference in Budapest*, 4 p.

- Ishii, A.L., Soong, D.T., and Sharpe, J.B., **2010**. Implementation and evaluation of the Streamflow Statistics (StreamStats) Web application for computing basin characteristics and flood peaks in Illinois: U.S. *Geological Survey Scientific Investigations Report 2009–5197*, 25 p.
- Jacob, D.J., **2004**. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Chapter III – Simple models, Princeton University Press, 22-34.
- Jacobson, R. B., Gran, K. B., **1999**. *Gravel sediment routing from widespread, low- intensity landscape disturbance, Current River Basin, Missouri*. *Earth Surf. Process. Landforms*, 24: 897-917. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199909)24:10<897::AID-ESP18>3.0.CO;2-6
- Jain, M., Murray, A.S., Botter-Jensen, L., **2004**. Optically stimulated luminescence dating: how significant is incomplete light exposure in fluvial environments? [Datation par luminescence stimulée optiquement: quelle signification en cas de blanchiment incomplet des sédiments fluviaux?]. *Quaternaire*, 15(1-2), Fluvial Archives Group. Clermond-Ferrant, 143 -157.
- Jain, V., Tandon, S.K., **2010**. Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal system, *Geomorphology*, Volume 118, Issues 3–4, 2010, Pages 349-358, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.002>.
- Jalowska, A.M., McKee, B.A., Laceby, P.J., Rodriguez, A.B., **2017**. Tracing the sources, fate, and recycling of fine sediments across a river-delta interface, *CATENA*, 154, 95-106
- Jarvis, K., **1989**. Determination of rare earth elements in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 4(7), 563-570, DOI: 10.1039/JA9890400563 jarvis1989
- Jasinska, M., Mietelski, J.W., Pociask-Karteczka, J., **1998**. Radionuclide Content in the Upper Vistula River Sediments in a Coal Mining Region in Poland (East-Central Europe). In *Water, Air, and Soil Pollution*, 102(3) 355-360
- Jeje, L.K., Ogunkoya, O.O., Oluwatimilehin, J.M., **1991**. Variation in suspended sediment concentration during storm discharges in three small streams in upper Osun Basin, Central Western Nigeria. *Hydrological Processes*, **5**, 361 – 369.
- Jenkins, R., **1978**. *X-ray Fluorescence Spectrometry*, Wiley, [ISBN 0-471-29942-1](#)
- Jenkins, R., De Vries, J. L., **1973**. *Practical X-ray Spectrometry*, Springer-Verlag, [ISBN 0-387-91029-8](#)
- Jenkins, R., Gould, R. W., Gedcke, D., **1981**. *Quantitative X-ray Spectrometry*, Marcel Dekker, New York, [ISBN 0-8247-9554-7](#)
- Johnson, K.L., **1991**. Effects of Longwall Coal Mining on the Hydrology of two Appalachian Stream Valleys. In *Proceedings: 5th National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring and Geophysical Methods*, Las Vegas, 1111-1125.
- Jones, P., Bradley, R., **1992**. *Climatic variations over the last 500 years. Climate Since AD 1500*. Routledge.
- Jose Ramon B. Cantalice, Moacyr Cunha Filho, Borko D. Stosic, Victor Casimiro Piscoya, Sergio M. S.
- Joshi, S., Xu, J.Y., **2017**. *Bedload and Suspended Load Transport in the 140-km Reach Downstream of the Mississippi River Avulsion to the Atchafalaya River Water 2017*, 9(9), 716, 28 p. doi:10.3390/w9090716 10.3390/w9090716
- Jourdain, C., **2017**. Action des crues sur la dynamique sédimentaire et végétale dans un lit de rivière à galets: l'Isère en Combe de Savoie. *Hydrologie*. Université Grenoble Alpes, 284 p.
- Jovanovic, N., Israel, S., **2012**. Critical Review of Methods for the Estimation of Actual Evapotranspiration in Hydrological Models. In *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*, Dr. Ayse Irmak (Ed.), ISBN: 978-953-307-808-3, InTech.
- Jowett, I. G., Hicks, D. M., **1981**. Surface, suspended and bedload sediment — Clutha River System. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, **20(2)**, 121–130. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/43944924>
- Jurchescu, M., **2013**, *Bazinul morfohidrografic al Oltețului. Studiu de Geomorfologie Aplicată*, Thèse de Doctorat, Université de Bucarest, 479 p.
- Kallis, G., Butler, D., **2001**. The EU water framework directive: measures and implications. *Water Policy*, 3, 125 – 142.



- Karner, F.R., Schobert, H. H., Zygarlicke, C.J., Hoff, J.L, Huber, T.P., **1987**. *Quantitative analysis of coal and coal components by scanning electron microscopy and electron microprobe analysis*, United States: N. p., 1987. Web. 49 – 61.
- Kasielke, T., Zepp, H., **2011**. Sediment fillings in valleys of the Ruhr area resulting from human impact in different periods of history. In *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände*, **55**(1), 51 – 65
- Kehew, A.E., Teller, J.T., **1994**. Glacial-lake spillway incision and deposition of a coarse-grained fan near Watrous, Saskatchewan. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31, 544-533.
- Kemp, P.A., **1985**. *Soil Micromorphology and the Quaternary*, Amsterdam: Elsevier, 79p.
- Kendall, M.G. **1975**. Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.
- Kessel R.H., **1992**. An approximation of the sediment budget of the lower mississippi river prior to major human modification, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.3290170707>, <https://doi.org/10.1002/esp.3290170707>, dernier accès le 14.10.2019
- Kesseli, J., **1941**. The concept of the graded river. *Journal of Geology*, 49, 561-588.
- Khalil, B., Ouarda, T.B., St-Hilaire, A., Chebana, F., **2010**. A statistical approach for the rationalization of water quality indicators in surface water quality monitoring networks, *Journal of Hydrology*, Volume 386, Issues 1–4, Pages 173-185, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.019>.
- Kiebosch-Fitt, E.M., 2012. *Geochemistry & Mineralogy of Fluvial Sediments in the Southern Alps, New Zealand*, Bachelor of Science (Honours), School of Earth & Environmental Science, University of Wollongong, 2012, <https://ro.uow.edu.au/thsci/32>
- Kirkby, M.J., Bracken, L.J., **2009**. Gully processes and gully dynamics. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34, 1841–1851, <https://doi.org/10.1002/esp.1866>.
- Klasen, N., Fiebig, M., Preusser, F., Radtke, U., **2006**. Luminescence properties of glaciofluvial sediments from the Bavarian Alpine Foreland. *Radiation Measurements*, 41, 866 - 870. DOI: [10.1016/j.radmeas.2006.04.014](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.04.014)
- Klösch, M., Habersack, H., **2017**. The Hydromorphological Evaluation Tool (HYMET), *Geomorphology*, 291, 143–158.
- Knighton, D., **1984**. *Fluvial Forms and Processes*, London: Edward Arnold, 218 p.
- Knom, J., Kuemmerle, T., Radeloff, V.C., Szabo, A., Mindrescu, M., Keeton, W.S., Abrudan, I., Griffiths, P., Gancz, V., Hostert, P., **2012**. Forest restitution and protected area effectiveness in post-socialist Romania. *Biological Conservation*, 146(1), 204-212.
- Koltun, G.F., **1985**. *Estimating annual suspended-sediment loads in the Northern and Central Appalachian Coal Region*, Raport al U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 17 p
- Kondolf, G.M., **1994**. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28(2–3), 225-243, ISSN 0169-2046, [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90010-8).
- Kondolf, G.M., Larson, M., **1995**. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. *Aquatic Conservation*, 5, 109-126.
- Kondolf, G.M., Micheli, **1995**. Evaluating stream restoration projects. *E.R. Environmental Management* (1995) 19: 1. <https://doi.org/10.1007/BF02471999>
- Kondolf, M., Piégay, H., **2003**. *Tools in fluvial geomorphology*, Edit. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, 441p.
- Konica Minolta., **2009**. *Precise Color Communication Color Control From Perception To Instrumentation*, KONICA MINOLTA SENSING, 59 p.
- Korup, O., **2005**, Geomorphic imprint of landslides on alpine river systems, southwest New Zealand, *Earth Surf. Process. Landforms*, 30, 783–800
- Kotsiantis, S., Kanellopoulos, D., **2006**. Discretization Techniques: A recent survey. En *GESTS International Transactions on Computer Science and Engineering*. 32(1), 47–58.
- Krumbein, W.C., Pettijohn, F.J., **1938**, *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton Century Crofts, New York, 549 p.
- Kummerle, T., Muller, D., Griffiths, P., Rusu, M., **2009**. Land use change in Southern Romania after the collapse of socialism, *Regional Environmental Change*, 9, 1-12.

- Kundzewicz, Z.W. and Robson, A.J., 2004. Change detection in hydrological records - a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal - Journal Des Sciences Hydrologiques*, 49(1): 7-19
- Kus, J., Araujo, C.V., Borrego, A.G., Flores, D., Hackley, P.C., Hamor – Vido, M., Kalaitzidis, S., Kommeren, C.J., Kwiecinska, B., Mastalerz, M., Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R., Misz-Kennan, M., Nowak, G.J., Petersenn, H.I., Rallakis, D., Suárez-Ruiz, I., Sýkorovao, I., Zivotic, D., **2017**. Identification of alginite and bituminite in rocks other than coal. 2006, 2009, and 2011 round robin exercises of the ICCP Identification of Dispersed Organic Matter Working Group, *International Journal of Coal Geology*, **178**, 26–38.
- Kwiecinska, B., Petersen, H.I., **2004**. Graphite, semi-graphite, natural coke, and natural char classification—ICCP system, *International Journal of Coal Geology*, 57, 99–116.
- Kwiecinska, B., Pusz, S., **2016**. Pyrolytic carbon — Definition, classification and occurrence, *International Journal of Coal Geology*, 163, 1–7.
- Labaye, G., **1948**, *Note sur le debit solide des cours d'eau*, La Houille Blanche, Numero special „A”, 600 – 627.
- Lacey, J. P., McMahon, J., Evrard, O., Olley, J., (**2015**), *A comparison of geological and statistical approaches to element selection for sediment fingerprinting*. *Soils Sediments*, 15, 211 – 2131. pp 2117–2131.
- Lacey, J.P., Olley, J., **2014**, An examination of geochemical modelling approaches to tracing sediment sources incorporating distribution mixing and elemental correlations. In *Hydrological processes*, 29(6), 1669–1685.
- Lal, R., Blanco, H., **2008**. *Principles of soil conservation and management*, Springer, 626 p.
- Lamagat, J.P., **1987**. *Modèle de propagation des crues du Niger entre Koulikourou et Niamey*. Niamey, ORSTOM, 93 p. 33865
- Lamagat, J.P., **1983**. *Analyse de la vitesse de propagation des crues. Application  la prévision des crues et des étiages: delta central du Niger, modèle provisoire de propagation*. Bondy, ORSTOM, 42 p. 33787
- Lamagat, J.-P., **1994**. *Analysis of the speed of propagation of flood waves*, 292 – 305 39701
- Lamagat, J.-P., Morel – Seytoux, H.J., Albergel, J., **1993**. Analyse de la propagation des ondes de crues, *Hydrologie continentale*, 8(2), 113-137 40773
- landscape connectivity in Andean ecosystems  
[http://wpg.forestry.oregonstate.edu/sites/wpg/files/seminars/05\\_Vanackeretal.pdf](http://wpg.forestry.oregonstate.edu/sites/wpg/files/seminars/05_Vanackeretal.pdf), dernier accès le 14.10.2019
- Lane, E., **1955**. The importance of fluvial morphology in hydraulics engineering. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the hydraulics Division*, 81, x p. pp., 1-17
- Lang, M., Lavabre, J., **2007**. Estimation de la crue centennale pour les plans de prévision des risques d’inondations, 232 p.
- Latuf, M., Amaral, E., **2016**. Assessment of suspended sediment discharge in the Purus River basin, Brazil, *International Journal of River Basin Management*, 14:4, 413-429, DOI: 10.1080/15715124.2016.1215322
- Lawler, D.M., Petts, G.E., Foster, I.D.L., Harper, S., **2006**. Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK. *Science of the Total Environment*, 360, 109–126, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.08.032
- Le Bescond, C., Thollet, F., Poulhier, G., Gairoard, S., **2018**. Des flux d’eau aux flux de matières en suspension et de contaminants associes: gestion d’un réseau de stations hydro-sédimentaires sur le Rhône. *La Houille Blanche - Revue internationale de l’eau*, EDP Sciences, 63-70.
- Le Coz, J., Bechon, P.M., Camenen, B., Dramais, G., **2014**. *Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses*
- Ledard, M., Gross, F., Haury, J., Lafontaine, L., Hubaud, M.-O., Vigneron, T., Dubos, C., Labat, J.-J., Aubry, M., Nioche-Seigneuret, F., Vienne, L., Craipeau, F., **2001**. *Restauration et entretien des cours d’eau en Bretagne. Guide technique*. DIREN Bretagne, Rennes. Société Riviere-Environnement, Bègles, 107 p.
- Legout, C., Poulencard, J., Nemery, J., Navratil, O., Grangeon, T., Evrard, O., Esteves, M., **2013**. Quantifying suspended sediment sources during runoff events in headwater catchments using spectrophotometry. In *Journal of Soils Sediments*, 13, 1478–1492.
- Lenzi, M.A., Mao, L., Comiti, F., **2006**. Effective discharge for sediment transport in a mountain river: Computational approaches and geomorphic effectiveness. *Journal of Hydrology*, 326, 257–276.
- Léonard, A., Augu, H., Zegel, P., Kreutzenberger, K., **2014**. *Referentiel des Obstacles  l’Ecoulement – ROE*. Descriptif de contenu – Version 6.0, 33 p.

- Leopold, L.B., Langbein, W.B., **1963**. Association and indeterminacy in geomorphology. În *The Fabric of Geology*, Palo Alto, California: Cooper and Co., 184-192.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. **1957**. River channel patterns; braided, meandering and straight. În *US Geological Survey Professional Paper*, 282-b, 39-85.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. **1964**. *Fluvial processes in geomorphology*, San Francisco, W.H. Freeman.
- Leopold, Luna B., **1954**. *Problems in Evaluating the Effects of Upstream Treatment* (Conservation Foundation, N.Y.C.), in Ninth Midwestern States Flood Control Conference, sponsored by Michigan Water Resources Committee, Michigan State College, p.103-111.
- Lester, E., Alvarez, D., Borrego, A.G., Valentim, B., Flores, D., Clift, D.A., Rosenberg, P., Kwiecinska, B., Barranco, R., Petersen, H.I., Mastalerz, M., Milenkova, K.S., Panaitescu, C., Marques, M. M., Thompson, A., Watts, D., Hanson, S., Predeanu, G., Misz, M., Wu, T., **2010**. The procedure used to develop a coal char classification—Commission III Combustion Working Group of the International Committee for Coal and Organic Petrology, *International Journal of Coal Geology*, 81, 333–342.
- Leys, K.F., Werrity, W.A., **1999**. River channel planform change: software for historical analysis. *Geomorphology*, 29, 107-120.
- Lian, O.B., Roberts, R.G., **2006**. Dating the Quaternary: progress in Luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2449 - 2468. DOI: [10.1016/j.quascirev.2005.11.013](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.11.013)
- Lidén, R., **2000**. *Conceptual Runoff Models for Material Transport Estimations*. Teză de doctorat, Universitatea Lund, Suedia, x p. 88 pages
- Liébault F., Taillefumier F., **2000**. L'évolution contemporaine de la bande active des principaux affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion (Préalpes du Sud, France). *Géocarrefour*, 75(4), . L'interface nature-sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux. pp. 327-336.
- Liébault, F., Clément, P., Piégay, H., Landon, N., **1999**. Assessment of Bedload Delivery from Tributaries: The Drôme River Case, France, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 31:1, 108-117, DOI: [10.1080/15230430.1999.12003286](https://doi.org/10.1080/15230430.1999.12003286)
- Liébault, F., Mathieu, C., Hugo, J., Sandrine, T., Talaska, N., **2010**. Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes, [https://www.researchgate.net/publication/312470861\\_Regime\\_sedimentaire\\_et\\_morphologie\\_des\\_rivieres\\_en\\_tresses\\_alpines\\_et\\_mediterraneennes](https://www.researchgate.net/publication/312470861_Regime_sedimentaire_et_morphologie_des_rivieres_en_tresses_alpines_et_mediterraneennes)
- Liebault, F., Piégay, H., **2002**. Causes of 20<sup>th</sup> century channel narrowing in mountain and piedmont rivers and streams of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.
- Liebault, F., Taillefumier, F., **2000**. L'évolution contemporaine de la bande active des principaux affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion (Préalpes du Sud, France). / The contemporary development of the active tract of the main tributaries of the Drôme, the Eygues and Roubion, in the southern pre-Alps of France. *Géocarrefour* Année 2000 75-4 pp. 327-336
- Lindberg, T., Bernhardt, E., Bier, R., Helton, A., Merola, R., Vengosh, A., Di Giulio, R.T., **2011**. Cumulative impacts of mountaintop mining on an Appalachian watershed. În *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108 (52).
- Lingling, Z., Jun, X., Chong-yu, X., Zhonggen, W., Leszek, S., Cangrui, L., **2013**. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 23(2): 359-369.
- Lionard, E., Dabrin, A., Coquery, M., **2015**. Essai collaboratif sur l'échantillonnage des sédiments de rivière: résultats et recommandations. Améliorer les opérations d'échantillonnage. *Rapport AQUAREF*, 142 p. C1c-Rapport-final-EIL\_sediment\_VF
- List, J., **2005**. *Sediment Budget, Encyclopedia of Coastal Science*, 2005 Edition | Editors: Maurice L. Schwartz
- Liteanu, E. Maroși, P., Rotman, S., Pricăjan, A., Bandrabur, T, Ghenea, C., **1959**. Raionarea hidrogeologică a teritoriului R.P. Române, *Probleme de geografie*, VI, București, x p.
- Liteanu, E., **1967**, *Pietrișuri sau Strate de Cîndești*, Studii tehnice și economice.
- Llena, M., Vericat, D., Cavalli, M., Crema, S., Smith, M.W., **2019**. The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments, *Science of The Total Environment*, Volume 660, 2019, Pages 899-912, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.479>.

- Lloyd, C.E., Freer, J.E., Johnes, P., Collins, A., **2016**. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. In *Science of the Total Environment*, 543, 388-404, DOI: org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.028
- Lloyd, C.E., Freer, J.E., Johnes, P.J., Collins, A.L., **2015**. Technical note: testing an improved index for analysing storm nutrient hysteresis. In *Hydrology and Earth System Sciences*, 12 (8), 7875–7892, DOI:10.5194/hess-20-625-2016
- Lobligeois, F., **2008**. *Etude des stratégies de couplage entre un modèle hydrologique et un modèle hydraulique. Rapport de stage de 3<sup>ème</sup> année*, 63 p. 2008-LOBLIGEIOIS-MASTER
- Loizeau, J. L., Arbouille, D., Santiago, S., Vernet, J. P., **1994**. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments. In *Sedimentology*, 41, 353–361.
- Lopez – Tarazon, J.A., Batalla, R.J., Vericat, D., Francke, T., **2009**. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*, 109, 210–221.
- Lord, M.L., Kehew, A.E., **1987**. Sedimentology and paleohydrology of glacial-lake outburst deposits in southeastern Saskatchewan and northwestern North Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, 99, 663-673.
- Ma, Y., Huang, H.Q., Xu, J., Brierley, G., Yao, Z., **2010**. Variability of effective discharge for suspended sediment transport in a large semi-arid river basin. *Journal of Hydrology*, 388, 357–369.
- Mac, I., **1986**. Geomorfologie dinamică. Editura Academiei, Bucurest, 214 p.
- Mackin, H.J., **1948**. Concept of the Graded River, *GSA Bulletin* (1948) 59 (5): 463-512.
- Macklin, M.G., Brewer, P.A., Bălțeanu, D., Coulthard, T.J., Basarab, D., Howard, A. J., Zaharia, S., **2003**. The long term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureș County, upper Tisa Basin, Romania. În *Applied Geochemistry*, 18, 241-257.
- Madej, M.A., **1999**. Temporal and spatial variability in thalveg profiles of a gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1153-1169.
- Magilligan, F., **1992**. Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology*, 5, 373 – 390.
- Malavoi, J.-R., Adam, P., **2007**. La restauration hydromorphologique des cours d'eau : concepts et principes de mise en œuvre, *Ingénieries-EAT*, 50, 49-61.
- Malavoi, J.R., Bravard, J.P., Piégay, H., Héroin, E., Ramez, Ph., **1998**. *Guide technique SDAGE n° 2. Méthode de délimitation de l'espace de liberté des cours d'eau*. Agence de l'eau RMC, 42 p.
- Malavoi, J.R., Garnier, C.C., Landon, N., Recking, A., Baran, Ph., **2014**. *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. Office national de l'eau et des milieux aquatiques. Disponibilă la adresa: [www.documentation.eaufrance.fr](http://www.documentation.eaufrance.fr).
- Malavoi, J.-R., **2003**. *Strategie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en riviere*, Eau Loire Bretagne, disponible en ligne a [http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace\\_documentaire/documents\\_en\\_ligne/guides\\_milieux\\_aquatiques/Etude\\_Seuil.pdf](http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_milieux_aquatiques/Etude_Seuil.pdf)
- Malavoi, J.-R., Bravard, J.-P., **2010**. *Eléments d'hydromorphologie fluviale*, Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 228 p. Disponibilă la adresa: [www.documentation.eaufrance.fr](http://www.documentation.eaufrance.fr).
- Mann, H.B. **1945**. Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171. DOI: 10.2307/1907187
- Mano, V., **2008**. *Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues*. These de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, 312 p.
- Marchi, L., Dalla Fontana, G., **2005**. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48, 218–228.
- Marian, D., Onica, I., **2012**. Ground surface subsidence as effect of underground mining of the thick coal seams in the Jiu Valley Basin. In *Archives of Mining Sciences*, 57 (3), 547-577.
- Marinescu, E., **2007**. *Studiul reliefului din bazinul hidrografic Gilort*, Universitatea din Bucuresti, 302 p.
- Marinică, I., (Oprea) Constantin, D.M., Marinică, A.F., Vătămanu, V.V., **2015**. Considerations on climate variability in south-western Romania in 2015, *Proceedings of the 3rd International Conference - Water resources and wetlands*. 8-10 September, 120 – 127.
- Marinică, I., **1995**. *Un caz de precipitații însemnate în Oltenia în sezonul rece cu evoluție rapidă* – (Studiu de caz situația din 19.02.1995), Comunicare la I.N.M.H.

- Marinică, I., **1996**. *Modelul statistic al precipitațiilor în Oltenia în anul 1995*, Comunicare la I.N.M.H.;
- Marinică, I., **2003**. *Fenomene meteorologice extreme în Oltenia*, Edit. MJM, Craiova, 280 p.
- Marinică, I., **2006**. *Fenomene climatice de risc în Oltenia*, Edit. Autograf MJM, Craiova, 386 p.
- Marinică, I., **2015**. Consideration on the variability of pluviometric regime in Oltenia in the interval 1961-2014. *Riscuri și Catastrofe*, 14(17), 2, 21-34
- Marron, D., **1992**. Floodplain storage of mine tailings in the belle fourche river system: A sediment budget approach. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.3290170704>, <https://doi.org/10.1002/esp.3290170704>, dernier accès le 14.10.2019
- Martínez-Carreras, N., Krein, A., Gallart, F., Fíliá, J.F., Pfistera, L., Hoffmann, L., Owens, P.N., **2010**. Assessment of different colour parameters for discriminating potential suspended sediment sources and provenance: a multi-scale study in Luxembourg. In *Geomorphology*, 118, 118–129.
- Martini, L., **2019**. *Sediment connectivity changes in an Andean catchment affected by volcanic eruption*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719334163>, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.303>, dernier accès le 14.10.2019
- Martonne, E., **1898**. *Sur les terrasses des rivières karpatiques en Roumanie. Sur l'évolution de la zone des dépressions subcarpatiques en Roumanie*, Paris, 5p
- Martonne, E., **1899**. *Sur l'histoire de la Vallée du Jiu (Karpates Meridionales)*, Paris, 3 p.
- Martonne, E., **1901**. *Étude sur la crue du Jiu au mois d'août 1900/ Studiu asupra creșterii creșterii? Jiului în luna august 1900*, Analele Institutului Meteorologic al României, Rennes, 20 p.
- Martonne, E., **1902**. *La Valachie: essai de monographie géographique*, Paris, 388 p.
- Martonne, E., **1904**. *Sur l'évolution du relief du Plateau de Mehedinți (Roumanie)*, Paris, 3 p.
- Martonne, E., **1906a**. *Notice sur les reliefs du Paringu et de Soarbele (Karpates Méridionales)*, Bucarest, 27 p.
- Martonne, E., **1906b**. *Recherches sur l'évolution morphologique des Alpes de Transylvanie (Karpates Meridionales)*, Librairie Ch. Delagrave, Paris, 279 p.
- Mason, J. A., Jacobs, P. M., Greene, R. S. B., Nettleton, W. D., **2003**. Sedimentary aggregates in the Peoria Loess of Nebraska, USA. In *Catena*, 53, 377–397.
- Masselink R.J.H., Keesstra, S.D., Temme Arnaud, J.A.M., Manuel, S., Giménez, R., Casali, J., **2016**. *Modelling Discharge and Sediment Yield at Catchment Scale Using Connectivity Components*, <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/503994>, <https://doi.org/10.1002/ldr.2512>, dernier accès le 14.10.2019
- Mateescu, I., **1962**. *Geologia zăcămintelor de cărbune*, Edit. de Stat Didactică și Pedagogică, București, 389 p.
- McCarney-Castle, K., Childress, T.M., Heaton, C.R., **2017**. Sediment source identification and load prediction in a mixed-use Piedmont watershed, South Carolina. *Journal of Environmental Management*, 185, 60-69.
- McCarthy, T.S., **2011**. The impact of acid mine drainage in South Africa. In *South African Journal of Science*, 107 (5/6), 1-7
- McCave, I. N., Bryant, R. J., Cook, H. F., Coughanowr, C. A., **1986**. Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments, *Journal of Sedimentary Petrology*, 56, 561–564.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., **1993** The relationship of drought frequency and duration to time scale. In *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, du 17 au 22 janvier 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.
- MDDELCC, **2016**. *Procédure d'échantillonnage pour le suivi de la qualité de l'eau en rivière, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques*, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 25p+1 annexe.
- Medialdea, A., Thomsen, K.J., Murray, A.S., Benito, G., **2012**. Reliability of equivalent – dose determination and age – models in the OSL dating of historical and modern paleoflood sediments. *Quaternary Geochronology*, 22, 11 - 24
- Mei, Y., Loth, M. A., Payne, M., Zhang, W., Smith, J., Day, C. S., Parkin, S. R., Heeney, M., McCulloch, I., Anthopoulos, T. D., Anthony, J. E., Jurchescu, O. D., **2013**. High Mobility Field-Effect Transistors with Versatile Processing from a Small-Molecule Organic Semiconductor. *Adv. Mater.*, 25: 4352-4357. doi:10.1002/adma.201205371



- Mekonnen, M., Keesstra, S., Stroosnijder, L., Baartman, J., Maroulis, J., **2014**. Soil Conservation Through Sediment Trapping: A Review, en *Land Degradation & Development*. 26. 10.1002/ldr.2308.
- Meloy, T.P. and Williams, M.C., **1991**. Particle Size Analysis, Proc. Conf. Particle Size Analysis Group, *An. Div. Royal Soc. Chem.*, ed. N.G. Stanley Wood and R. Lines, Sp. Publ. 102, 514-521, 243
- Mennel, T., Ziegler, H., Ebert, M., Nybo, A., Oberrauch, F., Hewicker, C., **2015**. *The hydropower sector's contribution to a sustainable and prosperous Europe*. Main Report, 96 p.
- Mercier, N., **2008**. Datation des sédiments quaternaires par luminescence stimulée optiquement : un état de question. *Quaternaire*, 19(3), 195-204.
- Merwade, V., **2012**. *Watershed and Stream Network Delineation using ArcHydro Tools*. Tutorial. 22p.
- Meylan, P., Musy, A., **1999**. *Hydrologie Frequentielle*, Editions HGA, Bucarest, Roumanie
- Mezghani, A., Hingray, B., **2009**. A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables in complex terrain. Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River Basin. *J. Hydrology*. 377 (3-4) : 245-260.
- Michel, C., **1991**. *Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux*, *Hydrology handbook* (in French), Cemagref, Antony, France
- Micu, M., **2008**, *Evaluarea hazardului legat de alunecari de teren in Subcarpatii dintre Buzau si Teleajen* (Landslide Hazard Assessment in the Buzău – Teleajen Subcarpathians). These de Doctorat, Institut de Geographie, Bucarest, 242p .
- Micu, M., Bălteanu, D., **2009**, Landslide hazard assessment in the Bend Carpathians and Subcarpathians, Romania. *Geomorphology*, 53(3), 49–64.
- Miedema, S., **2010**. *Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications*. WODCON XIX, Beijing China, September 2010, 19 p.
- Miedema, S., **2011**. Constructing the Shields Curve. *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2011* June 19-24, 2011, Rotterdam, the Netherlands, 16 p.
- Mihai, B. Nistor, C., Săvulescu, I., **2014**. *Dicționar Enciclopedic de Teledetecție cu elemente de fotogrammetrie și analiza imaginilor*, Vol I, Edit. Universității din București.
- Mihai, B., **2009**. *Teledetecție. Notiuni și principii fundamentale*, Edit. Universității din București.
- Mihăilescu, V., Onica, I., Cozma, E., **2013**. Dynamics of the technical and economic indicators of the Jiu Valley Coal Basin Mines. In *Annals of the University of Petroșani, Mining Engineering*, 14, 15-23.
- Militaru, F., Drăghici, I., **1985**. Desemnarea unor aspecte de vreme severă în România și tipurile barice sinoptice corespunzătoare. *Studii și cercetări meteorologice elaborate în 1981*, 43 – 61.
- Minea, G., Ioana-Toroimac, G., Zaharia, L., Zarea, R., Borcan, M., **2011**. Spatial Variation of Stream Power in the Buzău and Ialomița River Catchments (Romania). *Aerul și Apa – Componente ale mediului*, Presa Universitară Clujeană, Cluj-Napoca, 283 - 291.
- Minoniu, A.Ș., **2011**. Effects generated by high water in Gilort hydrographic basin. *Riscuri și Catastrofe*, 10(9), 2, 273 – 280
- Minoniu, A.Ș., **2011**. The triggering factors of the flood waves from the rivers in the Gilort hydrographic basin. *Risques et Catastrophes*, 10(9), p. 195 – 206.
- Mishra, K., Sinha, R., Jain, V., Nepal, S., Uddin, K., **2019**. *Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719301354>, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.118>, dernier accès le 14.10.2019
- Miță, P., **1986**. Temperatura apei și fenomenele de îngheț pe cursurile de apă din România, *Studii și cercetări de hidrologie*, **54**, IMH, București.
- Mociorniță, C., Birtu, E., **1987**. Unele aspecte privind scurgerea de aluviuni în suspensie în România, dans *Hidrotehnica*, 32(7), pp. 241-245, ISSN 0439-0962
- Moisescu, F., Mihai, O., **2006**. Environmental Financial Accounting, *Analele Universitatii "Dunarea de Jos" din Galati*, Fascicula de Economie si Informatica, An XII, nr.1, vol.1/2006, disponible en ligne a <http://www.dspace.ugal.ro/handle/123456789/992>
- Moldovan, C.S., Ionescu, C., Sbîrnă, L.S., **2013**. Using FBC technology to study the SO<sub>2</sub> Emissions resulting from combustion of Jiu Valley Coal. In *Annals of the University of Petroșani, Mining Engineering*, 14, 233-239.

- Mondal, S., Pravin Patel, P., **2018**. Examining the utility of river restoration approaches for flood mitigation and channel stability enhancement: a recent review. *Environmental Earth Sciences*, 77 - 195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7381-y>
- Montgomery, D. R. W. E. Dietrich, **1992**. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. In *Science*, 255, 826-830.
- Morariu, T., Mihăilescu, V., Dragomirescu, Ș., Posea, Gr., **1960**. Le stade actuel de recherches sur le périglaciaire de la R.P. Roumaine, en *Recueil d'études géographiques concernant le territoire de la R.P. Roumaine*. Edit. Academiei, București
- Morariu, T., Pișota, I., Buta, I., **1970**. *Hidrologie generală*, Edit. Didactică și Pedagogică. București.
- Morgan, P.C., **2005**. *Soil Erosion & Conservation*, Third Edition, Blackwell Publishing, 304 p.
- Moroșanu, G., **2014**. Assessing the maximum discharge in Coșuștea Hydrographic Basin with G.I.S. Techniques. A comparative analysis: SCN - CN Method vs. Topographic Wetness Index. *Analele Universității din Târgoviște*, Geographical Series Tome 14/2014 Issue 1.
- Moroșanu, G.A. Zaharia, L., Belleudy, P., Ioana-Toroimac, G., **2017**. Methodology to identify the leading factors of rivers' electrical conductivity. Case study: Jiu catchment, Romania. In *Air and Water Components of the Environment*, Cluj - Napoca, Edit. Casa Cărții de Știință, 26-33. 17. Moro anu G.A. ș , (2017), Forest cover changes and moisture content in the upper basin of Jiu River, Romania. In Roberto Tognetti, Giuseppe Scarascia Mugnozza and Thomas Hofer (editors). 2017. *Mountain Watersheds and Ecosystem Services: Balancing multiple demands of forest management in headwatersheds*. EFI Technical Report 101. European Forest Institute
- Moroșanu, G.A., **2016a**. Recent dynamics (1975 - 2012) of Coșuștea River's suspended sediment load at Corcova hydrometric station, *Actes de la Conference Internationale "Air and Water – components of the environment"*, Cluj-Napoca, 25-27 Mars, p. 282- 289
- Moroșanu, G.A., **2016b**. Analyse de la sensibilité du modèle hydrologique GR4J à l'évapotranspiration estimée avec des différentes méthodes. Etude de cas: le bassin hydrographique de la rivière Jiu, *Actes du XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Lausanne - Besançon 2016, 475 – 480
- Moroșanu, G.A., Zaharia, L., Belleudy, P., **2019**. Applying Colorimetric and Image Analysis Methods to Identify the Coal Areas Contributing to the Hydro-Sedimentary Dynamics in Jiu River Basin. *Proceedings of "Air and Water – components of the environment" International Conference*, Cluj-Napoca.
- Moroșanu, G.A., Zaharia, L., Ioana-Toroimac G., **2019**. An integrated methodology to estimate the contribution of environmental factors controlling the spatial variation of total dissolved solids. Application on Jiu River Basin (Romania). *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, 4 to 7 September 2019
- Moroșanu, G.A., Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., **2017**. Changes in forest and water management in the upper Jiu River catchment (Romania) : possible effects on the hydro-sedimentary dynamics. *Proceedings of the 17th International Conference SGEM 2017 - Planetary and Geo Sciences*, 17 (32), 749-756, Albena, DOI:10.5593/sgem2017/32/S14.097 4.
- Morris, C.G., **1992**. *Academic Press Dictionary of Science and Technology*, Harcourt Brace Jovanovich, San Diego, ISBN 978-0-12-200400-1.
- Mostert, E., **2003**. The European Water Framework Directive and water management research. *Physics and Chemistry of the Earth*, **28**, 523 – 527.
- Moțoc, M, Mircea, S., **2002**. *Evaluarea factorilor care determină riscul eroziunii hidrice în suprafață*, Edit Bren, București, p 60
- Moțoc, M. **1983**. Ritmul mediu de degradare erozională a solului în R. S. România, *Bul. Inform. ASAS*, nr.2, Bucarest, Roumanie.
- Moțoc, M. **1984**. Participarea proceselor de eroziune și a folosințelor terenului la diferențierea transportului de aluviuni în suspensie pe râurile din România, *Bul. Inf. ASAS*, 13, Bucarest, 16-28.
- Moțoc, M., Mircea, S., **2002**, *Evaluarea factorilor care determină riscul eroziunii hidrice în suprafață*, Edit. Bren, Bucarest, 60p

- Moțoc, M., Mircea, S., **2005**, *Unele probleme privind formarea viiturilor și eroziunea în bazine hidrografice mici*, Edit. Cartea Universitară, Bucurest, 104 p
- Moțoc, M., Munteanu, St., Băloiu, V., Stănescu, P., Mihai, G., **1975**, *Eroziunea solului și metode de combatere*, Edit. Ceres, Bucurest, 301p.
- Moțoc, M., Stănescu, P., Taloescu I., **1979**, *Metode de estimare a eroziunii totale și a eroziunii efluente pe bazine hidrografice mici* (Methods for assessing total erosion and sediment delivery within small catchments). Buletinul I.C.P.A., Bucurest, 38 p.
- Moțoc, M., Stănescu, P., Taloescu, I., **1979b**. *Metode de estimare a eroziunii totale și a eroziunii efluente pe bazine hidrografice mici* (Methods for assessing total erosion and sediment delivery within small catchments). Buletinul I.C.P.A., București, 38 p
- Mouelhi S., **2003**. *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. PhD thesis (in French), ENGREF, CemagrefAntony
- Mouelhi, F., S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., **2006**. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 200-214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014
- Mouri, G., Che Ros, F., Chalov, S., **2014**. Characteristics of suspended – sediment and river discharge during the beginning of snowmelt in volcanically active mountainous environment. *Geomorphology*, 213, 266–276.
- Muller, F., Burkhard, B., **2012**. The indicator side of ecosystem services, *Ecosystem Services*, 1, pp. 26–30, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.001>
- Munteanu, C., Kuemmerle, T., Boltiziar, M., Butsic, V., Gimmi, U., Lubos, H., Kaim, K., Király, G., Konkoly-Gyuró, E., Kozakh, J., Lieskovsk, J., Mojses, M., Müller, D., Ostafin, K., Ostapowicz, K., Shandra, O., Stych, P., Walker, S., Radeloff, V.C., **2014**. Forest and agricultural land change in the Carpathian region – A meta-analysis of long-term patterns and drivers of change, *Land Use Policy*, 38, pp. 685–697, 2014, DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.01.012.
- Munteanu, I., Dumitru, M., Florea, N., Canarache, A., Lacatusu, R., Vlad, V., Simota, C., Ciobanu, C., Rosu, C., **2005**. Status of Soil Mapping, Monitoring, and Database Compilation in Romania at the beginning of the 21<sup>st</sup> century. European soil bureau - research report, 9, 281 – 296.
- Murgeanu, G., Liteanu, E., **1968**, *Harta geologică 1:200 000*, foaia Slatina, Institutul Geologic, Bucurest
- Murgoci-Munteanu, G., **1908**, *Terțiarul din Oltenia cu privire la sare, petrol și ape minerale*, An IG, I, p.1-128, 74 fig., 5 pl., rez. L germ, Bucurest
- Murray, A.S., Olley, J.M., **2002**. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria*, 21, Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology, 1-16.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., **2000**. Luminescence dating of quartz using an improved regenerative-dose single-aliquot protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., **2003**. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 37, 377-381.
- Musgrave, G.W., **1955**. How much of the rain enters the soil? In *Water: U.S. Department of Agriculture*. Yearbook. Washington, DC. 151–159.
- Mustatea, A., **2005**. *Viituri excepționale pe teritoriul României*, Editura Tipografica SC Onesta Com Prod 94 SRL, ISBN 973-0-03611-X, Bucurest, Roumanie
- Mustățea, A., **1996**. *Viituri excepționale pe teritoriul României: geneză și efecte*, Teză de doctorat, Institutul de Geografie, 411 p
- Mustățea, A., **2005**. *Viituri excepționale pe teritoriul României: geneză și efecte*, Editura Institutului Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor, București, 411 p.
- Musy, A., **1998**. *Hydrologie appliquée*, Edit. H.G.A., București, 365p
- Mutihac, V, Stratulat, M. I., Fechet, R. M., **2007**. *Geologia României*, Editura Didactică și Pedagogică, ISBN 973-30-1858-2, Bucurest, Roumanie
- Mutihac, V., **1990**, *Structura geologică a teritoriului României*, Edit. Tehnică, Bucurest
- Mutihac, V., Ionesi, L., **1973**. *Geologia României*, Edit. Tehnică, București.

- Mutihac, V., Stratulat, I.M., Fechet, M.R., **2004**, *Geologia Romaniei*, Edit. Didactică și Pedagogică R.A., Bucurest, 249 p.
- Nafooti, H.M., **2012**. Marl Land Classification Using Principal Components Analysis (PCA) for the Sustainable Development of Natural Resources. În *2012 International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE*, **32**, 68-72.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., **1970**. River flow forecasting through conceptual models part 1. Adiscussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Navratil, O., Evrard, O., Esteves, M., Legout, C., Ayrault, S., Nemery, J., Mate-Marin, A., Ahmadi, M., Poirel, A., Bonte, P., **2012**. *Temporal variability of suspended sediment sources in an alpine catchment combining river/ rainfall monitoring and sediment fingerprinting*. *Earth Surface Processes and Landforms*, **37**, 828 – 846.
- Neamu, G., **1998**. *Clima Olteniei deluroase*, Edit. Ars Docendi, București, 107p.
- Nejc, B., Mojca, Š., Matjaž M., **2015**. Analyses of suspended sediment loads in Slovenian Rivers, *Hydrological Sciences Journal*, 1-30.
- Nelson, M.S., Harrison, J.G., Johnson, J.A., Feathers, J.K., Mahan, S.A., **2015**. User Guide for Luminescence Sampling in Archaeological and Geological Contexts. *Advances in Archaeological Practice*, 3(2), 166–177. DOI: 10.7183/2326-3768.3.2.166
- Nemery, J., Gratiot, N., Doan. P.T.K., Duvert, C., Alvarado-Villanueva, R., Duwig, C., **2015**. Carbon, nitrogen, phosphorus, and sediment sources and retention in a small eutrophic tropical reservoir. *Aquatic Sciences*, 19 p.
- Némery, J., Mano, V., Coynel, A., Ercheber, H., Moatar, F., Meybeck, M., Belleudy, P., Poirel, A., **2013**. Carbon and suspended sediment transport in an impounded alpine river (Isère, France), *Hydrological Processes*, **27**, 2498–2508.
- Nevin, C., **1946**. Competency of moving water to transport debris. *Geological Society of America Bulletin*, **57**, 651-674.
- Neyman, J. Pearson, E. S., **1933**. On the Problem of the Most Efficient Tests of Statistical Hypotheses, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **231**, 289–337.
- Ngounou-Ngatcha, B., Sebag, D., Favreau, G., Servat, E., Laignel, B., Garba, Z., Durand, A., **2010**. *Le projet « MORphodynamique des bassins-versants et flux hyDro-sEDimentaires associés*, 7p Disponibilă la adresa: [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers12-11/010054510.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-11/010054510.pdf)
- Niekerk, H., Silberbauer, M.J., Maluleke, M., **2014**. Geographical differences in the relationship between total dissolved solids and electrical conductivity in South African rivers, *South-African Water Research Commission*, 133 – 138.
- Nistor C., **2005**. Relieful antropic și procesele geomorfologice specifice în spațiul exploatărilor de lignit din Oltenia, *Terra*, XXXII - XXXIV (LII-LIV), 2002-2005, București
- Nistor, C., **2002**. *Bazinul carbonifer Motru: Natura locurilor - studiu de geologie și geografie*, Edit. MediaTM, Bacău. 242 p.
- Nistor, C., **2007**. *Influența activităților de exploatare a lignitului asupra evoluției reliefului în Dealurile Jițului*, Teză de doctorat, Facultatea de Geografie, Universitatea București.
- Nistor, C., **2011**. *Dealurile Jițului: Influența activităților de exploatare a lignitului în dinamica reliefului*, Edit. Universității din București, București, 276 p.
- NOAA, **2018**, *Global Climate Change Rapport – Annual 2018*. Disponible sur: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201813>. Dernier acces – 14.03.2019
- O'Connor, J.E., **1983**. *Hydrology, Hydraulics and Geomorphology of the Bonneville Flood*, Boulder, Colorado: Geographical Society of America, 83 p.
- O’Kane, J.P., **2005**. Hysteresis in Hydrology. *Acta Geophysica Polonica*, **53**(4), 373-383
- Obled, C., Zin, I. Hingray, B., **2009**. Choix des pas de temps et d’espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues. *La Houille Blanche*, **5**, 81-87.
- Obreja, F., **2009**. Câteva aspecte privind transportul de aluviuni în suspensie pe cursul inferior al râului Soloneț. *Analele Universității "Ștefan cel Mare" Suceava*, Secțiunea Geografie, Anul XVIII, 105-116.



- Obreja, F., **2011**. The sediment transport of the Siret River during the floods from 2010. *Forum geografic. Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*, XI, Issue 1, 90-99.
- Obreja, F., **2012a**, The sediment transport of the Siret River during the floods from 2010. *Forum geografic. Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*, 11(1), 90–99. doi:10.5775/fg. 698 2067-4635.2012.064.i
- Obreja, F., **2012b**. Assessment of trap efficiency of the reservoirs in the Siret Basin (Romania), *Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava. Geography Series*, 21, 107-117.
- Obreja, F.G., **2013**. *Studiul transportului de aluviuni în bazinul hidrografic Siret*, Teză de doctorat, Suceava.
- Olariu, P., Gheorghe, D., **1999**. *The effects of human activity on land erosion and suspended sediment transport in the Siret hydrographic basin, in Vegetation, land use and erosion processes* (editat I. Zăvoianu, D. E. Walling, P. Șerban), Institut de Geografie, 4050, Bucurest.
- Olive, V., Ellam, R.M., Wilson, L., **2001**. A protocol for the determination of the rare earth elements at picomole level in rocks by ICP-MS: Results on Geological Reference Materials USGS PCC-1 and DTS-1. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 25(2-3). DOI: 10.1111/j.1751-908X.2001.tb00597.x
- Olley, J., Caitcheon, G., Murray, A., **1998**. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Geochronology*, 17, 1033 – 1040.
- Olley, J., Caitcheon, G., Roberts, R.G., **1999**. The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 30, 207 – 217.
- Olley, J., Pietsch, T., Roberts, R.G., **2004**. Optical dating of Holocene sediments from a variety of geomorphic settings using single grains of quartz. *Geomorphology*, 60, 337 – 358.
- Olley, J.M., Murray, A., **1996**. The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burial dose rates in fluvial sediments. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)*, 15, 751-760.
- ONEMA, **2012**, *Evolutions observées dans les débits des rivières en France*. Office National de l'eau et des milieux aquatiques, Vincennes.
- Onibon, H., Ouarda, T.B.M.J., Barbet, M., St-Hilaire, A., Bobee, B., Bruneau, P., **2004**. Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec, Canada / Regional frequency analysis of annual maximum daily precipitation in Quebec, Canada, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 717 – 735.
- Onțel, I., Moroșanu G.A., **2013**. Assessing drought severity and its impact on vegetation within Oltenia Plain using NDVI from MODIS (2000-2010), *Risques et catastrophes*, 14(1), 21 – 30.
- Onțel, I., Vlăduț, A., **2015**. Impacts of drought on the productivity of agricultural crops with the Oltenia Plain, Romania, *Geographica Pannonica*, 19(1), 6-19.
- Oprea, R., **2013**. *Compendiu de pedologie*, Edit. Universitara, Bucurest, 226 p.
- Orășanu, I., Iurkiewicz, A., **2010**. *Karst hydrogeology of Romania*, Edit. Belvedere, Oradea, 443 p
- Ordonez – Regil, E., Garcia-Rosales, G., **2011**. Analysis of lanthanides and actinides in sea sediments from the Gulf of Tehuantepec. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 289, 197 – 201.
- Ortelecan, M., **1997**. *The study of ground surface displacement under the underground mining of Jiu Valley Coal Deposits - Eastern Zone* (in Romanian). These de doctorat, Universite de Petroșani, Faculte de Mines, 195 p.
- Osterkamp, W.R., **2008**. Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology, Office of Surface Water, U.S. Geological Survey, Reston, VA, 54 p.
- Oudin, L., **2004**. *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-debit global*, Thèse de doctorat pour obtenir le grade de Docteur de l'ENGREF Spécialité : Sciences de l'eau, Paris.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil and C. Loumagne, **2005**. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.
- Oyedotun, T.D.T., **2018**. X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24749508.2018.1452459>, <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>



- Page, E., **1957**. Estimating the point of change in a continuous process, *Biometrika*, 44(2):248–252.
- Palcu, M., Melinte, M. C., Jurkiewics, A., Witek, G., Rotaru, A., **2008**. Inventarierea preliminară a structurilor acvifere din partea sudică a României. În *GEO-ECO-MARINA*, **14**, Supliment nr. 1.
- Paltani, S., **2010**. *Monte Carlo Methods. Statistics Course for Astrophysicians*, University of Geneva, 90 p.
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L., **2012**. “European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements”; *Land Use Policy*, 29 (2), 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., **2015**. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5, 117-126.
- Panagos, P., Jones, A., Bosco, C., Senthil Kumar P.S., **2011**. European digital archive on soil maps (EuDASM): preserving important soil data for public free access. *International Journal of Digital Earth* (2011), 4 (5), pp. 434-443. DOI:[10.1080/17538947.2011.596580](https://doi.org/10.1080/17538947.2011.596580)
- Parsons, A.J., Cooper, J., Wainwright, J., **2015**. What is suspended sediment?, *Earth Surface Processes and Landforms* 40(10) doi: 10.1002/esp.3730
- Patel, V., Parikh, P., **2013**. Assessment of seasonal variation in water quality of River Mini, at Sindhrot, Vadodara, *International Journal of Environmental Sciences*, 3(5), 1425-1436.
- Paul Meylan, Anne-Catherine Favre, André Musy, 2008, *Hydrologie fréquentielle : une science prédictive*, PPUR presses polytechniques, 173 p.
- Paul, M.K., Sen, S., **2012**. The occurrence of TDS and Conductivity of Domestic Water in Lumding Town of Nowgong District of Assam, N.E. India. În *Current World Environment*, 7(2), 251 – 258
- Peiry, J.-L., **1990**. Les torrents de l'Arve: dynamique des sédiments et impact de l'aménagement des bassins versants sur l'activité torrentielle. În *Revue de géographie alpine*, 78, 25-58
- Pektas, A.O., Dogan, E., **2015**. Prediction of bed load via suspended sediment load using soft computing methods. *Geofizika*, **32**, 27 – 46, DOI: 10.15233/gfz.2015.32.2 32-
- Perrin, C., Andréassian, V., Michel, C., Oudin, L., **2005**. GR4J: a parsimonious model for rainfall-runoff simulations, *En Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Paris.
- Perrin, C., C. Michel and V. Andréassian, **2003**. Improvement of a parsimonious model for stream-flow simulation, *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- Petit, F., **1984**. Le processus contrôlant l'évolution de la trace d'une rivière ardennaise. În *Geomorphologie*, 49, 95-109
- Petit, F., Houbrechts, G., **2003**. Utilisation of metallurgic slags for the study of fluvial dynamics: determination of the effective competency of rivers and estimation of the transit time of sedimentary waves. În *Geomorphologie: relief, processus, environnement*, 1, 3-12.
- Petit, F., Pauquet, A., **1997**. Bankfull discharge recurrence interval in gravel-bed rivers. În *Earth Surface Processes and Landforms* 22(7), 685-694.
- Petit, P., Houbrechts, G., Peeters, A., Hallot, E., Van Câmpenhout, J., Denis, A.C., **2015**. Dimensionless critical shear stress in gravel-bed rivers. În *Geomorphology*, 250, 308-320.
- Petrescu, I., Bițoiianu, C., Nicorici, M., Mărgarit, G., Nicorici, E., Păruțoiu, I., Todros, C., Popescu, D., **1986**. *Geologia zăcămintelor de cărbuni. Vol I – Probleme fundamentale*, Edit. Tehnică, București, 314 p.
- Petrescu, I., Bițoiianu, C., Nicorici, M., Mărgarit, G., Nicorici, E., Păruțoiu, I., Todros, C., Popescu, D., **1986**. *Geologia zăcămintelor de cărbuni. Vol II – Probleme fundamentale*, Edit. Tehnică, București, 386 p.
- Petrișor, A.I., **2012**. Dynamics of the environmental transformation processes during 1990-2006 in Romania reflected by land cover and land use changes, *Present Environment and sustainable development*, 6(1), 353-365.
- Petrișor, A.I., **2015**. Using Corine Data to look at deforestation in Romania: distribution & possible consequences, *Urbanism. Arhitectură. Construcții*, 6(1), pp. 83-90, 2015.
- Petruț, T., **2017**. *Développement d'indicateurs de la dynamique spatio-temporelle sédimentaire d'un cours d'eau mesurés par acoustique passive*. These de Doctorat, 320 p.
- Pettitt, A. N., **1979**. A non-parametric approach to the change point problem. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C, Applied Statistics* 28, 126-135.

- Phillips, F.M., Wilson, J., L., Davis, J.M., **1989**. Statistical analysis of hydraulic conductivity distributions: a quantitative geological approach. În *Proceedings of the Conference on New Field Techniques for Quantifying the Physical and Chemical Properties of Heterogeneous Aquifers*, 19-31.
- Pickel, W., Kus, J., Flores, D., Kalaitzidis, S., Christanis, K., Cardott, B.J., Misz-Kennan, M., Rodrigues, S., Hentschel, A., Hamor-Vido, M., Crosdale, P., Wagner N., **2017**. Classification of liptinite – ICCP System 1994. *International Journal of Coal Geology* 169, 40–61.
- Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C., **2009**. Modelling the suspended sediment dynamics of a large tropical river: the Upper Niger River basin at Banankoro. *Hydrological Processes*, 23(22), 3193-3200.
- Piégay, H., Barge, O.; Bravard, J.P., Landon, N. Peiry, J.L., **1996**. Comment délimiter l'espace de liberté des rivières. Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 24èmes Journées de l'Hydraulique: l'eau, l'homme et la nature, 275-284, Paris, Société Hydrotechnique de France
- Pinto, G.F., Escalfoni, R., SaintPierre, D., **2012**. Sample Preparation for Determination of Rare Earth Elements in Geological Samples by ICP-MS: A Critical Review. *Analytical Letters*, 45(12), 1537-1556, DOI: 10.1080/00032719.2012.677778
- Pinto-Martins, D., **2008**. La dynamique des flux d'eau et de la charge de fond sur le haut parana (Brésil) : un modèle pour l'aménagement de grands fleuves impactés par les barrages. Thèse de doctorat, Université Lyon 2, Brésil, Doctorat de Géographie, Université Lyon 2, 304 p.
- Pișota, I., Zaharia L., Diaconu D., **2005**. *Hidrologie*, Edit. Universitară, București, 256 p., ISBN 973-749-002-9
- Pișota, I., Zaharia, L., **2002**. *Hidrologie*, Edit. Universității din București, 447 p, ISBN 973-575-587-4.
- Pișota, I., Zaharia, L., Diaconu, D., **2010**. *Hidrologie*, Edit. Universitara, Bucarest, Roumanie, ISBN: 606-591-046-1
- Platagea, G., **1958**. Studiul ploilor torențiale pe teritoriul României și influența lor asupra scurgerii. În *Meteorologia, hidrologia și gospodărirea apelor*, 4(4), București.
- Platon, V., Frone, S., Constantinescu, A., **2015**. New developments in assessing forest ecosystem services in Romania, *Procedia Economics and Finance*, 22, 45–54, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00225-7).
- Pleniceanu, V., **1999**. *Apele din Câmpia Olteniei*. Edit. Universitaria, Craiova, 354 p.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C., **2003**. Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *Catena*, 50: 91– 133
- Poesen, J.W., **2011**. Challenges in gully erosion research, *Landform Analysis*, 17, 5-9
- Poesen, J.W., Vandaele, K., Van Wesemael, B., **1996**. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium July 1996)*. IAHS Publ. no. 236, 252 – 257.
- Poesen, P.J., Torri, D.B., Vanwallegem, T., **2011**, *Gully Erosion Procedures to Adopt when Modelling Soil erosion in Landscapes affected by gullyng*. Morgan and Nearing (coord.) Handbook of Erosion Modelling, Wiley-Blackwell
- Pop, E. **1962**. Cercetari geologice în partea de est a Bazinului Petroșani, *Extras des Travaux de l'Institute de Mines, Petroșani*, 30 p.
- Pop, E., **1971**. Condițiile de sedimentare ale depozitelor din Bazinul Petroșani (jud. Hunedoara), *Extras des Travaux de l'Institute de Mines*, 8, 22 p.
- Pop, E., **1993**. *Monografia geologică a Bazinului Petroșani*. Edit. de l'Académie Roumaine, Bucarest, 304 p.
- Pop, G., **2000**. *Carpații și Subcarpații României*, Edit. Presa Universitatea Clujeană, Cluj-Napoca, 264p
- Popa, M.E., Predeanu, G., Ghiran, M.D., Mariș, I., Pirnea, R., **2017**. *Pliocene Coals and Neogene Formations of the Prahova County: Field Trip Guide*, 69th ICCP Annual Meeting Bucharest, Romania, Romanian Academz Librarz, 3 – 9 September 2017, 66 p.
- Popescu – Voitesti, I., **1932**. Le Bassin de Petroșani dans le cadre géologique des dépressions carpathiques internes, *Extras du Bulletin de la Société Roumaine de Géologie*, I, 57-70
- Popescu, G.C., Tămaș-Bădescu, S., Tămaș-Bădescu, G., Bogatu, L., Neacșu, A., **2007**. *Geologia economică a aurului*, ed. Aeternitas, Alba Iulia, 537 p.
- Popescu, M., Jelev, I., **1984**. *Calculul hidraulic la regimuri tranzitorii. Studii și cercetari de mecanica aplicata*, Edit. Didactică și Pedagogică, București.

- Popovici, E.A., Bălteanu, D., Kucsicsa, G., **2013**. Assessment of changes in land-use and land-cover pattern in Romania using corine land cover database, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 8(4), 195-208.
- Posea, G., **2002**, *Geomorfologia României*, Edit. Fundației România de Măine, Bucurest
- Posea, G., **2002**. *Harta Unităților de Relief ale României*, Edit. Fundației România de Măine, București, x p.
- Posea, G., Badea, L., **1982**. Regionarea geomorfologică a teritoriului României, *Bul SSG*, VI
- Posea, G., Grigore, M., Popescu, N., Ielenicz, M., **1976**, *Geomorfologie*, Edit. Didactică și Pedagogică, Bucurest
- Posea, G., Popescu, N., Ielenicz, M., **1974**. *Relieful României*, Edit. Științifică, București, 484p
- Povară R., **2004**. *Climatologie Generală*, Edit. Fundația România de Măine, București, 244 p.
- Prahl, F. G., J. R. Ertel, M. A. Goni, M. A. Sparrow, and B. Eversmeyer B., **1994**. "Terrestrial Organic-Carbon Contributions to Sediments on the Washington Margin". *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 58 (14): 3035–48.
- Preda, I., **1979**. *Geologia zăcămintelor de cărbuni (Note de curs și lucrări practice)*, Universitatea din București, Facultatea de Geologie-Geografie, 358 p.
- Preda, I., Maroși, P., **1971**. *Hidrogeologie*, Edit. Didactică și Pedagogică, București.
- Preda, I., Pasere, D., **1985**. *Valea Jiului - de la izvoare până la vărsare*, Edit. Sport-Turism, București, 219 p.
- Preda, I., Turculet, I., Androhovici, A., Barus, T., **1993**. *Geologia zăcămintelor de cărbuni. Partea I. Introducere în geologia cărbunelui*, Edit. Universității București, București, 418 p.
- Preda, I., Turculet, I., Androhovici, A., Barus, T., **1994**. *Geologia zăcămintelor de cărbuni. Partea a II-a. Răspândirea zăcămintelor de cărbuni*, Edit. Universității București, București, 392 p.
- Priestley, M.B. and Subba Rao, T., **1969**. A Test for Non-Stationarity of Time-Series. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **31**, 140-149, <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1969.tb00775.x>
- Prișcu, R., **1974**. *Construcții hidrotehnice*, vol. II, Edit. Didactică și Pedagogică București, 425 p.
- Pritchard, P., Mitchell, J.W., **2016**. *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, New York
- Prodanov, D., Verstreken, K., **2012**. Automated Segmentation and Morphometry of Cell and Tissue Structures. Selected Algorithms in ImageJ, Molecular Imaging, Prof. Bernhard Schaller (Ed.), *InTech*, 183 – 208, DOI: 10.5772/36729.
- Prohasjka, T., Hann, S., Latkpczy, C., Stinger, G., **1999**. Determination of rare earth elements U and Th in environmental samples by inductively coupled plasma double focusing sectorfield mass spectrometry (ICP-SMS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1, 8 p.
- Protopopescu-Pake, E., Murgoci, G.M., **1912**. Manuscris al Hărții geologice a României la scara 1:500 000 (Oltenia de sud-vest). Collection I. Stelea
- Provansal, M., Dufour, S., Sabatier, F., Anthony, E.J., Raccasi, G., Robresco, S., **2014**. The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: Hydropower dams versus other control factors. *Geomorphology*, 219, 27-41
- Pye, K., Blott, S. J., **2004**. Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. In *Forensic Science Int.*, 144, 19–27.
- Rădoane, M., Rădoane, N., **2003**. Morfologia albiei râului Bârlad și variabilitatea depozitelor actuale, *Revista de geomorfologie*, 4, 85 – 97.
- Random House, **1996**. *Webster's Dictionary*, 2<sup>nd</sup> edition, New York, Ballantine Books.
- Rantz, S. E., **1963**. An Empirical Method of Determining Momentary Discharge of Tide-Affected Streams, Hydrology of tidal streams geological survey water-supply paper 1586-D
- Rantz, S. E., Harris, E. E., **1963**. Floods of January-February 1963 in California and Nevada, Open-file report U. S. Geological Survey Water Resources Division Menlo Park, Calif. March 1963
- Raychaudhuri, S., **2008**. Introduction to Monte Carlo Simulation. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*.
- Rădoane, M., Rădoane, N., Dumitriu, D., **2003**. *Geomorphological evolution of river longitudinal profiles*. *Geomorphology* 50, 293–306
- Rădoane, M., Rădoane, N., Ichim, I., **2002**. Analiza granulometrică și petrografică a faciesului de albie al râului Suceava, *Seminarul Geografic Dimitrie Cantemir*, 9 – 20.

- Rădoane, M., **2016**. *Influența mineritului asupra transportului de aluviuni pe râul Jiu*. Chapitre 7 – Impactul antropic în morfogeneză en Landform Dynamics and Evolution in Romania (865 p), Springer Verlag, 470 – 491.
- Rădoane, M., **2017**. *Impactul antropic în morfogeneză*, 470 – 491.
- Rădoane, M., Cristea, I., Rădoane, N., **2011**. Cartografierea geomorfologică. Evoluție și tendințe I, <http://geo-spatial.org>
- Rădoane, M., Ichim, I., Dumitriu, D., **2001**. *Geomorfologie*. Vol. II. Editura Universității Suceava, Roumanie, 510 p.
- Rădoane, M., Rădoane, N., Ichim, I., Dumitriu, D., Miclăuș, C., **2002**. Granulometria depozitelor de albie în lungul unor rauri carpatice/ Channel deposit grain size along the Carpathian streams. *Revista Geografică, Institutul de Geografie*, t. VIII, 70 - 77.
- Rădoane, M., Rădoane, N., **2004**. Geomorfologia aplicată în analiza hazardelor naturale. *Riscuri și catastrofe*, Universitatea „Babes-Bolyai” Cluj-Napoca, 57 –68.
- Rădoane, M., Rădoane, N., **2005**. Dams, sediment sources and reservoir silting in Romania. *Geomorphology*, 71, 112–125.
- Rădoane, M., Rădoane, N., **2005**. Dams, sources and reservoir silting in Romania, *Geomorphology*, 71,112– 125
- Rădoane, M., Rădoane, N., **2007**. *Geomorfologie aplicată*, Edit. Universității Suceava, Suceava, 377p.
- Rădoane, M., Rădoane, N., Dumitriu, D., Miclăuș, C., **2006**. Efectele surselor de aluviuni asupra distribuției materialului de albie al râurilor est-carpătice, En *Studii și cercetări de Geografie*, No. LI-LIII, 153-168, ISSN 1220-5281
- Rădoane, M., Rădoane, N., Dumitriu, D., **2003**, Geomorphological evolution of river longitudinal profiles. *Geomorphology*, 50, 293–306.
- Rădoane, M., Rădoane, N., Dumitriu, D., Cristea, I., **2006**. Granulometria depozitelor de albie ale râului Prut între Oroftcana și Galați, *Revista de Geomorfologie*, 8, 53 - 64
- Rădoane, N., **1987**. Cercetări privind eroziunea în suprafață pe parcele experimentale din sectorul mijlociu al văii Bistriței moldovenești (aria flișului), *Lucr. Semin. geogr. "Dimitrie Cantemir"*, 7, 17-26.
- Rădoane, N., **2002**, *Geomorfologia bazinelor hidrografice mici*, Edit. Universității Suceava, Suceava, 255 p.
- Rădoane, N., Rădoane, M., Ichim, I., Miclaus C., **1995**. Influențele mineritului asupra tranzitului de aluviuni pe râul Jiu, amonte de Sadu. *Studii si Cercetari de Geologie, Geofizica, Geografie. Seria Geografie*.
- Răileanu, G., **1952**. *Cercetări geologice în regiunea Câmpul lui Neag - Uricani și considerațiuni generale asupra Bazinului Petroșani*, Institutul Geologic, București, 39, 12 p.
- Răileanu, G., Grigoraș, N., Oncescu, N., Plisca, T., **1963**. *Geologia zăcămintelor de cărbuni: cu privire specială asupra teritoriului R.P.R.*, Edit. Tehnică, București, 344 p.
- Rebrisoreanu, M., Traistă, E., Matei, A., Barbu, O., Codrea, V.A., **2002**. The impact of the bituminous coal combustion from the thermoelectric power plant from Paroșeni on the environment of Jiu valley. *Studia Universitatis Babes-Bolyai, Geologia, XLVII*, 1, 117-126
- Reid, L. M., Trustrum, N. A., **2002**. Facilitating Sediment Budget Construction for Land Management Applications. *Journal of Environmental Planning and Management*, 45(6), 865–887. doi:10.1080/0964056022000024389
- Reid, L.M., Dunne, T. **1996**. Rapid evaluation of sediment budgets. Catena Verlag GMBH, Reiskirchen, Allemagne, 165 p.
- Réménieras, G, **1960**. *Eléments d'hydrologie appliquée*, Edit. Eyrolles, Paris.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., **1997**. *Predicting Soil Loss by Water: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Handbook, vol 703, US Department of Agriculture, Washington DC
- Rheinheimer, D., Yarnell, S., **2017**. Tools for Sediment Management in Rivers, *Water for the Environment*, <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/sediment-budget>, dernier accès le 14.10.2019
- Rice, S., Church, M., **1998**. Grain size along two gravel-bed rivers; statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. În *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 345-363.
- Richards, K., **1982**. Rivers. Form and process in alluvial channels, Methuen, London and New York, 1982. No. of pages: xi + 358.
- Ritter, D., **1986**, *Process Geomorphology*, WCB, Dubuque, Iowa.

- Roche, P.-A., Miquel, J., Gaume, F., (de) Marsily, G., **2012**. *Hydrologie quantitative: Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Verlag France, 590 p ISBN-10: 2817801059
- Roditis, J.C., Pont, D., **1993**. *Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhone a l'amont immédiat de son delta*. Méditerranée, tome 78, **3.4.**, La Camargue et le Rhone, homes et milieux, 5 – 18.
- Roehl, J. E., **1962**. Sediment source areas-, delivery ratios and influencing morphological factors. In *Commission of Land Erosion (Symposium of Bari, 1-8 October 1962)*, IAHS Publ., 59, 202 - 213.
- Rohwer, H.E., Hosten, E., Smith, L., **1995**. Lanthanides - Separation and Analysis, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: *International Journal*, 15(1-4), 142-142
- Rollet, A.-J., **2012**. *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial a l'aval d'un barrage: le cas de la basse vallée de l'Ain*, Teză de doctorat, Universitatea Jean Moulin, Lyon 3, Lyon, 305p
- Rosgen, D., **1996**. Applied River Morphology. *Wildland Hydrology Books*, Pagosa Springs, Colorado, 350p
- Roșca, D., Theodor, S. **1990**. Influența lacurilor de acumulare asupra transportului de aluviuni, în vol. *Lucrările celui de al III - lea Simpozion " Proveniența și efluența aluviunilor"*, Piatra Neamț, Roumanie, 197 - 203 p.
- Roșu, A., **1967**. *Subcarpații Olteniei dintre Motru și Gilort: studiu geomorfologic*, Edit. Academiei Republicii Socialiste România, Bucuresti, 155 p.
- Roșu, A., **1973**. *Geografia fizică a României*, Edit. didactică și pedagogică, București, 435p.
- Roșu, Al., **1956**. Aspecte morfologice din zona de confluență a Jiului cu Motru și Gilort. *Probleme de Geografie*, III, 183 – 204.
- Roșu, V., **2005**, *Contribuția evenimentelor tectonice din Terțiar în definirea structurii geologice și crearea condițiilor necesare formării zăcămintelor de hidrocarburi în sectorul dintre văile Olt și Jiu al Depresiunii Getice*, These de doctorat, Faculte de Geologie et Geophysique, Universite de Bucarest.
- Rotaru, A., **2009**. *Contribuții la simularea regimului de curgere al izvoarelor carstice cu aplicație la sistemul carstic Motru Sec-Baia de Aramă*, Teză de doctorat, Facultatea de Geografie, Universitatea București, 154 p.
- Roux, A.L., **1982**. *Cartographie poly thématique appliqué à la gestion écologique des eaux: étude d'un hydro système fluvial: le Haut-Rhône français*, Lyon: CNRS-Piren, 113 p.
- Roy, N.G., Sinha, R., **2014**. Effective discharge for suspended sediment transport of the Ganga River and its geomorphic implication. *Geomorphology*, 227, 18-30.
- Russak, A., Sivan, O., Herut, B., Lazăr, B., Yechieli, Y., **2015**. The effect of salinization and freshening events in coastal aquifers on nutrient characteristics as deduced from column experiments under aerobic and anaerobic conditions. *Journal of Hydrology*, 529(3), 1282-1292, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.034>.
- Sabatier, P., Poulenard, J., Fanget, B., Reyss, J.-L., Develle, A.-L., Wilhelm, B., Ployon, E., Pignol, C., Nafrechoux, E., Dorioz, J.-M., Montuelle, B., Arnaud, F., **2014**. *Long-term relationships among Pesticide applications, mobility, and soil erosion in a vineyard watershed*, PNAS, 111(44), 15647–15652.
- Saint-Venant, B., **1871**. *Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit*. C.R. [Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences. Paris.] 73, 147-154, 237-240.
- Salvador, P.G., Fontugne, M., Berger, J.F., Gauthier, E., **2005**. Etude des enregistrements sédimentaires holocènes des paléoméandres du Rhône dans le secteur des basses terres (Ain, Isère, France), en Quaternaire. DOI: 16.10.4000/quaternaire.517.
- Salvador, Pierre-Gil, Bravard, Jean-Paul, Vital, J., Voruz, J.L., **1993**. Archeological evidence for Holocene floodplain development in the Rhone valley, France. Z., en Geomorph. N.F. 88. 81-95.
- Samani, A.N., Rad, F.T., Azarakhshi, M., Rahdari, M.R., Rodrigo-Comino, J., **2018**. Assessment of the Sustainability of the Territories Affected by Gully Head Advancements through Aerial Photography and Modeling Estimations: A Case Study on Samal Watershed, Iran. *Sustainability*, 10, 2909; 17 p., doi:10.3390/su10082909
- Sambou, S., Nicaise, E., Nimy, M., **2006**. Critique statistique des séries des pluies annuelles dans le bassin amont du Fleuve Sénégal. In *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308, 319 – 324.



- Sams I, J.I., Beer, K.M., **2000**. *Effects of coal-mine drainage on stream water quality in the Allegheny, and Monogahela River Basins – sulfate transport and trends*, Water-Resources Investigations Report 99-4208, U.S. Geological Survey, 17p.
- Sanchez – Montoya, M., Arce, M.I., Vidal – Abarca, M.R., Suarez, M.L., Prat, N., Gomez, R., **2012**. Establishing physico-chemical reference conditions in Mediterranean streams according to the European Water Framework Directive. *Water Research*, 46, 2257 – 2269.
- Sandu, I., Mateescu, E., Marinică, I., Vătămanu, V.V., **2012**. Considerații privind clima Olteniei și tendințe actuale, [Considerations climate on the Oltenia and current trend], *Analele Universității din Craiova*, XVII, 44-80.
- Sandu, M., **2007**, Relevanța hărții geomorfologice generale în identificarea arealelor expuse riscului. Subcarpații getici dintre Tărăia și Cornățel, *Revista geografică*, XIII/2006.
- Saporta, G., **2006**. Probabilités, analyse des données et statistique, 622 p., Editions TECHNIP, Paris, France
- Savin, C., **1973**. Aspecte hidrologice ale viiturilor pe râurile din Oltenia din luna octombrie 1972. *Protecția Mediului, resurse de apă și gospodărirea apelor*, Seria A, no. 9, CIDH, Bucurest, Roumanie,
- Savin, C., **1974**. Raportul amplitudinilor variației nivelului apei râului Jiu și al apelor freatice. *Lucrările Sesiunii Științifice Jubiliare a IMH*, Bucurest, Roumanie.
- Savin, C., **1982**. Caracteristici ale undelor de viitură în bazinul hidrografic Jiu – Studiu de detaliu. *Revue Hidrotehnica*, 9, CNA, Bucurest.
- Savin, C., **1990**. Reevaluarea scurgerii de aluviuni in suspensie in spatial hidrografic Cerna – Jiu – Dunăre (studiu complet), *Revue Hidrotehnica*, 9, CAN, Bucurest.
- Savin, C., **1990**. *Resursele de apă ale Luncii Jiului*, Edit. Scrisul Românesc, Craiova, 288 p.
- Savin, C., **1993**. Particularități ale evoluției stratului de zăpadă și a scurgerii apei în spațiul hidrografic Jiu – Dunăre în iarna 1992/1993, *Revue Hidrotehnica*, 38(9), RAAR, Bucurest.
- Savin, C., **1994**. Particularități și tendințe în evoluția temperaturii aerului și precipitațiilor în Oltenia în verile anilor 1992 și 1993. *Revue Mediul înconjurător*, 5(4), ICIM, Bucurest.
- Savin, C., **1994**. Scurgerea minimă pe râul Jiu în perioada de secetă 1993 – 1993. *Revue Hidrotehnica*, 10, RAAR, Bucurest.
- Savin, C., **1994**. Valori excepționale ale unor mărimi meteorologice și hidrologice înregistrate în spațiul hidrografic Jiu – Dunăre în perioada mai – august 1991, *Revue Hidrotehnica*, 39(1), RAAR, Bucurest.
- Savin, C., **1995**. Climatul Olteniei spre aridizare?, *Revue Hidrotehnica*, 6, RAAR, Bucurest.
- Savin, C., **1996**. *Dicționar științific poliglot pentru domeniile: hidrologie, gospodărirea apelor, meteorologie, protecția mediului și alte discipline conexe – complementare*, I, Edit. Tipored, Bucurest.
- Savin, C., **1996**. L'assèchement des rivières dans l'espace hydrographique Jiu – Danube. Etude de synthèse. Les travaux de 3<sup>ème</sup> Rencontres hydrologiques Franco – Roumaines, Volume spécial, Montpellier, 4-6 septembre 1995.
- Savin, C., **1996**. L'écoulement minimum sur la rivière Jiu pendant la période de sécheresse 1992 – 1993. Les travaux de 3<sup>ème</sup> Rencontres hydrologiques Franco – Roumaines, Volume spécial, Montpellier, 4-6 septembre 1995.
- Savin, C., **1997**. Compensation des débits d'eau sur la rivière Jiu par dérivation. Efficience, implications. Les travaux de 4<sup>ème</sup> Rencontres hydrologiques Franco – Roumaines, Hydrologie et gestion intégrée des eaux à l'échelle du bassin versant, 3-5 septembre, Suceava, Roumanie.
- Savin, C., **2000**. *Apele subterane din zona Craiova*. Edit. Tipored, București, 313 p.
- Savin, C., **2001**. *Hidrologia râurilor – teoretică și aplicată*, Edit. Reprograph, Craiova, 625 p
- Savin, C., **2003**. *Râurile din Oltenia, Fenomene hidrologice de risc excepțional*, Edit. Universitaria, Craiova, 350 p
- Savin, C., **2004**. Recorduri hidrologice pe râurile din Oltenia. In *Analele Universității Spiru Haret Seria Geografie*, 7, 57 - 74.
- Savin, C., **2005a**. Metoda hidrometrică de evaluare a dinamicii albiei minore. Aplicație la râul Jiu. În *Lucrările Seminarului Geografic "Dimitrie Cantemir"*, 25, 9p.
- Savin, C., **2005b**. *Variația scurgerii medii de aluviuni în suspensie pe râurile din Oltenia în ultimii 50 de ani*. *Lucrările Seminarului Dimitrie Cantemir*, 25, 77-85.
- Savin, C., **2008**. *Râurile din Oltenia. Monografia hidrologică*, Edit. Sitech, Craiova, 613 p.

- Săndulache, C., **2009**. *Hazarde si riscuri naturale în Munții Parâng*, Teză de doctorat, Universitatea București, Facultatea de Geografie, 328 p.
- Schimel, D. S., **1995**. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1, 77-91. doi:10.1111/j.1365-2486.1995.tb00008.x
- Schmidt, A.R., B.C. Yen., **2001**. "Stage-Discharge Relationship in Open Channels." In: Proceedings of the Third International Symposium on Environmental Hydraulics, Tempe, AZ, December 5-8, 2001
- Schmidt, J. (coord.), **2000**. *Soil Erosion - Application of Physically Based Models*, Environmental Science, Springer, 315p.
- Schmidt, K.-H., Morche, D., **2006**. Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology*, 80, 131–145.
- Schmitt, L., Maire G., Humbert, J., **2000**. Typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau: vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud-occidental du fossé rhénan. *Géocarrefour*, 75(4), L'interface nature-sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux, 347-363.
- Schumm, S. A., **1969**. River Metamorphosis, *Journal of the Hydraulics Division*, 1969, Vol. 95, Issue 1, 255-274, disponible en ligne a <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0015935>
- Schumm, S. A., **1981**. Evolution and response of the fluvial system: Sedimentologic implications. *Soc. Econ. Paleon. Mineral. Spec. Pub.*, 31, 19-29.
- Schumm, S. A., Lichty, R. W., **1965**. Time, space and causality in geomorphology. În *American Jour. Science*, 263, 110-119.
- Schumm, S.A., **1977**. *The fluvial system*, Edit. John Wiley & Sons, New York, 338p
- Schumm, S.A., Mosley, M.P., Weaver, W.E., **1987**. *Experimental Fluvial Geomorphology*, New York: John Wiley and Sons, 413 p.
- Schwanghart, W., Heckmann, T., **2012**. Fuzzy delineation of drainage basins through probabilistic interpretation of diverging flow algorithms, *Environmental Modelling & Software*, Volume 33, 2012, Pages 106-113, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.016>.
- Schwarzenbach, R.P., Geschwend, P. M., Imboden, D.M., **2003**. *Environmental Organic Chemistry*. Part IV & V, John Wiley & Sons, 775-1185.
- Schweinfurth, S.P., **2009**. *An introduction to coal quality*, Chapitre en "The National Coal Resource Assessment Overview", U.S. Geological Survey, 16 p.
- Ściażko, M., **2013**. Physical and chemical properties of coal and its products. Lecture no.L-02-1, 25p, Available at <http://home.agh.edu.pl/~Istepien/Gasification/Lectures/L2-1.pdf>
- Seibert, J., Vis, M., **2012**. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. În *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 3315–3325.
- Sen, P.K., **1968**. Robustness of Some Nonparametric Procedures in Linear Models, *The Annals of Mathematical Statistics*, 39(6), pp. 1913 – 1922.
- Sevastjanova, I., Hall, R., Alderton, D., Lal, R., Blanco, H., **2012**. A detrital heavy mineral viewpoint on sediment provenance and tropical weathering in SE Asia. *Sedimentary Geolog*, 280, 179–194.
- Shabalala, A.N., Combrinck, L., McCrindle, R., **2015**. *Effect of farming activities on seasonal variation of water quality of Bonsma Dam, KwaZulu-Natal*, South African Journal of Science, 109 (7/8), DOI: 10.1590/sajs.2013/20120052
- Shlens, J., **2003**. *A tutorial on principal component analysis. Derivation, discussion and singular value decomposition*, 16 p.
- Shretstha, S., Kazama, F., **2007**. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. În *Environmental Modelling & Software*, 22, 464-475.
- Shumway, R.H. and Stoffer, D.S., **2011**. *Time Series Analysis and Its Applications (With R Examples)*. Springer: New York.
- Siergieiev, D., Widerlund, A., Lundberg, A., Almqvist, L., Collomp, M., Ingri, J., Ohlander, B., **2014**. Impact of Hydropower Regulation on River Water Composition in Northern Sweden, În *Aquatic Geochemistry*, 20, 59-80
- Sima, M., **2011**. *Mineritul și poluarea râurilor din Munții Metaliferi. Aplicații în bazinele hidrografice ale Crișului Alb și Certejului*, Edit. Academiei Române, București, 254 p.

- Simard, P., **2013**. *Effet des variables environnementales sur la propagation de crue. Mémoire présenté en cours de l'obtention du diplôme de maîtrise de dynamique de la géomorphologie fluviale*, Université du Québec à Rimouski, 178 p.
- Simon, A., Doyle, M., Kondolf, M., Shields, F., Rhoads, B., McPhillips, M., **2007**. Critical Evaluation of How the Rosgen Classification and Associated “Natural Channel Design” Methods Fail to Integrate and Quantify Fluvial Processes and Channel Response1. (JAWRA) *Journal of the American Water Resources Association*, 43: 1117-1131. doi:10.1111/j.1752-1688.2007.00091.x
- Singh, V.P., **2016**. *Handbook of applied hydrology*, Second Edition, 1440 p.
- Sizemore, H. G., Schmidt, B. E., Buczkowski, D. A., Sori, M. M., Castillo-Rogez, J. C., Berman, D. C., S. Marchi et al., **2019**. A global inventory of ice-related morphological features on dwarf planet Ceres: Implications for the evolution and current state of the cryosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 1650– 1689. <https://doi.org/10.1029/2018JE005699>
- Smith, D.G., **1993**. Fluvial Geomorphology: Where do we go from here?. *Geomorphology*, 7, 251 – 262.
- Smith, L., **2002**. *A tutorial on Principal Components Analysis*, 27 p.
- Smith, S.J., Esralew, R.A., **2010**. *StreamStats in Oklahoma—Drainage Basin Characteristics and Peak-Flow, Frequency Statistics for Ungaged Streams*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 68 p.
- Snelder, T.H., Biggs, B.J.F., **2002**. Multi-Scale River Environment Classification for Water Resources Management. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(5), 1225-1240.
- Stănescu, P., Taloescu, I., Drăgan, L., **1969**, *Contribuții la stabilirea unor indicatori de estimare a erozivității pluviale*, An. I.C.I.F.P. PEDOL. II (XXXVI), 361-369.
- Stewardson, M.J., Datry, T., Lamouroux, N., Pella, H., Thommeret, N., Valette, L., Grant, S.B., **2016**. Variation in reach-scale hydraulic conductivity of streambeds, *Geomorphology*, 259, 70-80.
- Stoica, C., Struțu, M., **1964**. Studiul precipitațiilor abundente care determină viituri și inundații pe principalele râuri din R.S.R., *Simpozionul Internațional "Precipitații Atmosferice"*, București, 109 – 131.
- Stokes, S., **1999**. Luminescence dating applications in geomorphological research. *Geomorphology*, 29(1-2), 153-171. DOI:10.1016/S0169-555X(99)00012-4
- Storti, F., Balsamo, F., **2010**. Particle size distributions by laser diffraction: sensitivity of granular matter strength to analytical operating procedures. In *Solid Earth*, 1, 25–48.
- Strahler, A. N., **1952**. "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology", *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117–1142
- Strahler, A., Strahler, A.N., **1999**. *Introducing Physical Geography*, New York, Wiley
- Štrbac, S., Kašanin Grubin. M., Vasić, N., **2017**. *Importance of background values in assessing the impact of heavy metals in river ecosystems: case study of Tisza River, Serbia*. *Environ Geochem Health*, 19 p.
- Suárez, J., **1998**. Deslizamiento y estabilidad de Taludes en zonas tropicales, Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos, 550 p.
- Suarez-Ruiz, I., Crelling, J., **2008**. *Applied Coal Petrology. 1st Edition. The role of Petrology in Coal Utilisation*, Academic Press, 408 p.
- Suárez-Ruiz, I., Valentim, B., Borrego; Á.G., Bouzinos, A., Flores, D., Kalaitzidis, S., Malinconico, M.L., Marques, M., Misz-Kenan, M., Predeanu, G., Montes, J.R., Rodrigues, S., Savalas, G., Wagner, N., **2015**. *Atlas of Fly Ash Occurrences Identification and Petrographic Classification of Fly Ash Components Working Group, Commission III – ICCP*, International Committee for Coal and Organic Petrology – ICCP, 203 p.
- Sun, S., **2017**. biogeosciences.net, dernier accès le 14.10.2019- <https://www.biogeosciences.net/14/2495/2017/bg-14-2495-2017.pdf>
- Sun, S., Schefuß, E., Mulitza, S., Chiessi, C., Sawakuchi, A., Zabel, M., Baker, P., Hefter, J., Mollenhauer, G., **2017**. Origin and processing of terrestrial organic carbon in the Amazon system: Lignin phenols in river, shelf, and fan sediments, *Biogeosciences*, 14, 2495-2512. 10.5194/bg-14-2495-2017.
- Supatimusro, D., Areerachakul, N., Poomsripanon, J., **2013**. The applied Geographic Information System and the Relation of Mollusk with Water Quality in Ayutthaya Province, Thailand. *Energy Procedia*, 34, 99-108.
- Surdeanu, V., **1979**, Recherches expérimentales de terrain sur les glissements. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 15, 49–64.

- Surdeanu, V., **1985**, Considerații asupra inventarierii alunecărilor de teren în vederea întocmirii hărților de risc, *Lucr Sem Geogr Dimitrie Cantemir*, Univ Al. I. Cuza, Iași, 5, 1984.
- Susperregui, A.S., **2008**. *Caractérisation hydro-sédimentaire des retenues de Cointzio et d'Umécuaru (Michoacan, Mexique) comme indicateur du fonctionnement érosif du bassin versant*, Thèse de doctorat Université Jeseph-Fourier Grenoble I, 289 p.
- Sykorova, W., Pickel, W., Christanis, K., Wolf, M., Taylor, G.H., Flores, D., **2005**. Classification of huminite—ICCP System 1994, *International Journal of Coal Geology*, 62, 85– 106
- Syvitski, James, P. M., **2007**. *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*, Cambridge University Press, 388p.
- Șandric, I., **2008**, *Sistem informațional geografic temporal pentru analiza hazardelor naturale. O abordare bayesiană cu propagare a erorilor* (Temporal geographic information system for the analysis of natural hazards. A Bayesian approach with error propagation). These de doctorat, Universite de Bucarest, 243 p.
- Șchiopoiu, A., **1982**. *Dealurile piemontane ale Coșuștei*, Edit. Scrisul Românesc, Craiova, 174 p
- Șerban, A., Mititelu – Ionuș, O., **2011**. Ecological Status Assessment of the Water Bodies Located in the Lower Sectors of the Jiu and the Motru Rivers (Oltenia, Romania). *Forum géographique. Etudes et recherches de géographie et la protection de l'environnement*, 10(1), 195-206. DOI: 10.5775/fg.2067-4635.2011.038.i
- Șerban, S.A., **2008**. *Nitrates vulnerable zones in Jiu river basin*. *Analele Universității din Craiova, Seria Agricultură – Montanologie – Cadastru*, vol. XXXVIII/A 2008, Edit. Universitaria, Craiova, 516 – 521.
- Șerban, S.A., **2011a**. *Calitatea apelor de suprafață în bazinul hidrografic inferior al râului Jiu*, Teză de doctorat, Facultatea de Geografie, Universitatea din București, 133 p.
- Șerban, S.A., **2011b**. Surface water pollution with heavy metals in the lower catchment of Jiu river basin, according to the Water Framework Directive (2000/60/EC). En *Aerul și Apa Componente ale Mediului*, Cluj - Napoca, Edit. Presa Universitară Clujeană, 357 – 364.
- Șerban, S.A., Ionuș, O., **2011**. Ecological status assessment of the Water Bodies located in the lower sector of the Jiu and the Motru rivers (Oltenia, Romania), *Forum Geografic*, 10(1), 195-206.
- Ștefănescu, V., Ștefan, Sabina, **2011**. Synoptic context of floods and major flash floods in Romania during 1948-1995, *Romanian Reports in Physics*, Vol 63, No. 4, 1083-1098, Bucharest;
- Tang, W., Carely, S.K., **2018**. *HydRun: A MATLAB toolbox for rainfall-runoff analysis*, Accepted Manuscript, 37 p.
- Tanner, M.A., **1996**. Tools for statistical inference: Methods for the Exploration of Posterior Distributions and Likelihood Functions. În *Springer Series in Statistics*, 137-192.
- Tarboton, D. G., **1989**. *The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data*. Teză de doctorat, Department of Civil Engineering. MIT, Cambridge, Massachusetts, 252 p.
- Tarboton, D. G., **1997**. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33, 309 - 319.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., **1991**, On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, *Hydrologic Processes*, 5(1), 81-100.
- Tarboton, D.G., Dash, P., Sazib, N., **2015**. TauDEM, Terrain Analysis Using Digital Elevation Models.
- Taylor, G.H., Teichmuller, M., Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R., Robert, P., **1998**. *Organic Petrology*, Gebruder Borntraeger, Berlin – Stuttgart, 704 p.
- Tămaș-Bădescu, S., **2010**. *Contribuții privind geologia economică a aurului în România*. Teza de doctorat, București
- Telcean, I.C., Roland, E.M., Copșa, D., **2017**. The fishes' last stand: the fish fauna of Jiu River Gorge, between decades of coal mining and present day hydroenergetic works. În *Ecomont*, 9(1), 15 – 21.
- Theiler, D., Reynard, E., Lambiel, C., Bardou, E., **2010**. The contribution of geomorphological mapping to sediment transfer evaluation in small alpine catchments. In *Geomorphology*, 124, 113-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.006>
- Thiery, Y., **2007**, *Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux 'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste*, Thèse de doctorat (manuscrit), Université de Caen/Basse Normandie.
- Thiessen, A.H., **1911**. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39(7): 1082-1084.
- Thomas L., **2002**, *Coal Geology*, Edit. John Wiley & Sons, LTD, Chichester, Marea Britanie, 384p.

- Thorne, C.R., **1998**. *Stream Reconnaissance Handbook. Geomorphological Investigation and Analysis of River Channels*, Edit. John Wiley and Sons, Chichester, U.K.
- Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D., **1997**. *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, Chichester, UK: John Wiley and Sons, 376 p.
- Thorne, C.R., Thompson, A., **1995**. Geomorphology at Work. În *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(7), 583-705
- Thornes, J. B., Brunsten, D., **1977**. *Geomorphology and time*. Halstead Press, Wiley, 208 p.
- Thornthwaite, C.W., **1948**. An Approach toward a Rational Classification of Climate, *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1:55-94.
- Thorsten, Pohlert, **2018**. Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/vignettes/trend.pdf>, 18 p, dernier accès le 14.10.2019
- Timar – Gabor, A., Constantin, D., Anechitei – Deacu, V., Ștepoaie Cărdan, I., **2013**. Datarea prin luminescență stimulată optic. Chapitre VII du volume *Dozimetrie prin termoluminescență (TL) și luminescență stimulată optic (OSL): aplicații în studii de mediu*, Presa Universitară Clujeană, 263 - 230 (Timar-Gabor, A., 400 p. ISBN: 978-973-595-534-2.)
- Timar, A., Vandenberghe, D., Panaiotu, E.C., Panaiotu, C.G., Necula, C., Cosma, C., Van den haute, P. **2010**. Optical dating of Romanian loess using fine-grained quartz. *Quaternary Geochronology*, 5(2-3), 143-148. DOI: [10.1016/j.quageo.2009.03.003](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2009.03.003)
- Timar-Gabor, A., Vasiliniuc, S., Vandenberghe, D., Constantin, D., Cosma, C., **2011**. Luminescence dating of archaeological materials and sediments in Romania using quartz. *Romanian Reports in Physics*, 63(4), 929-939.
- Țița, M.C., Roșca, D., Bala, I., **2013**. Water quality assessment of Jiu River in Craiova- Romania Advances in Environment, *Ecosystems and Sustainable Tourism*, 181 – 186.
- Tomescu, V., **2004a**. Caracteristicile apelor subterane dintre Jiu și Coșuștea (Piemontul Motrului). *Forum Geografic – Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*, 3, 91 – 97.
- Tomescu, V., **2004b**. *Podișul piemontan al Motrului. Studiu de geografie regională*, Edit. Universitaria, Craiova.
- Tomozeiu, R., Busuioc, A., Ștefan, S., **2002**. Changes in seasonal mean of maximum air temperature in Romania and their connection with large - scale circulation: In *International Journal of Climatology*, 22, 1181 – 1196.
- Topor, N., **1964**. *Ani ploioși și secetoși în Republica Populară Română*, Institutul Meteorologic, București, 304 p.
- Torres, J., **1984**. *Analyse détaillée du transfert de sédiment du continent vers le bassin: Le Quaternaire terminal au large du Delta du Rhône (Méditerranée nord-occidentale)*. Teză de doctorat, 353 p.
- Toșa – Turdeanu, A., **1975**. *OLTENIA. Geografie istorică în hărțile secolul XVIII*, Edit. Scrisul Românesc, Craiova
- Traistă, E., Ciocan, V., **2000**, *Tratamentul apelor reziduale*, Edit. Universitas, Petroșani.
- Traistă, E., Ionică, M., **2006**, *Influența activităților industriei miniere asupra calității apelor de suprafață din Valea Jiului*, Buletinul AGIR, 3, 53 – 57.
- Trajikovska, A., Galster, J., Feng, H., Qian, Y., Olsen, K.K., **2014**. Tracing the origin of fine-grained fluvial sediment using radionuclides with management implications. *Anthropocene*, 5, 52 – 58.
- Tramblay, Y., Ouarda, T., Saint-Hilaire, A., Poulin, J., **2010**. Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics, *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 305-317.
- Trent, V.A., Medlin, J.H., Coleman, S.L., Stanton, R.W., **1982**. Chemical analyses and physical properties of 12 coal samples from the Pocahontas Field, Tazewell County, Virginia, and McDowell County, West Virginia. *Geological Survey Bulletin* 1528, 37 p.
- Trușa, V., Trușa C. **1975**. *Hidrochimie*, Tipografia Universității București. București, 272 p.
- Tucker, C. J., **1980**. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*, 10, 23-32.
- Tudose, M., **2005**. *Influența parametrilor de calitate asupra ecosistemelor acvatice din Valea Jiului*. Volume du Colloque Scientifique National „Geoecologie și procesarea resurselor minerale”, Université de Petroșani, p. 13 – 18.
- Tueros, I., Borja, A., Larreta, J., Rodriguez, J.G., Valencia, V., Millan, E., **2009**. Integrating long-term water and sediment pollution data, in assessing chemical status within the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 1389 – 1400.



- Tufescu, V., **1964**, Typologie des glissements de Roumanie. *Revue Roum Géol Géophys Géogr.*, 7, 140–147.
- Tufescu, V., **1966**, *Modelarea naturală a reliefului și eroziunea accelerată* (Natural relief modelling and accelerated erosion). Edit. Acad. R.S.R, Bucarest, 155–256.
- Tufescu, V., Mocanu, C., **1964**. *Depresiunea Petroșani*, Edit. Științifică, București, 88p.
- Tuley, M.D., Bilotta, G.S., Arbocciute, G., Chadd, R.P., Extence, C.A., Brazier, R.E., **2016**. Quantifying submerged deposited fine sediments in rivers and streams using digital image analysis, *River Research And Applications*, 11 p.
- Tuomenvirta, H., **2001**. Homogeneity adjustments of temperature and precipitation series – Finnish and nordic data. In *International Journal of Climatology*, 21, 495 – 506.
- Ujvari, I., **1972**. *Geografia apelor României*, Edit. Științifică, București, 590 p.
- Ulrich, M., Bureau, S., Chauvel, C., Picard, C., **2012**. Accurate Measurement of RareEarth Elements by ICP-MS after Ion-Exchange Separation: Application to Ultra-Depleted Samples. *Geostandards and Geoanalytical Research*, Wiley, 2012, 36 (1), 31 p.
- UNISDR, **2009**, *Terminology on disaster risk reduction*. United Nations Geneva [http://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologyEnglish.pdf](http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf). Denier accès: 19.07.2019
- Urdea, P. **1989**. *Munții Retezat: studiu geomorfologic*, Teză de doctorat, Universitatea "Al.I.Cuza" Iasi, Facultatea de Biologie-Geografie-Geologie, These de doctorat (manuscris), 186 p.
- Uscătescu, M.R., **2013**. *Impactul asupra mediului produs de amenajările hidroenergetice de mică putere*, Târgu Jiu, 62 p.
- Uwe, S., **2012**. *Etude hydrodynamique des petits cours d'eau temporaires de l'interfluve Loison – Othain (Lorraine Nord)*, Rapport de stage Master I, Universitatea Lorraine
- Vaishali, P., Punita, P., **2013**. Assessment of seasonal variation in water quality of River Mini, at Sindhrot, Vadodara. În *International Journal of Environmental Sciences*, 3(5), 1424-1436.
- Valentim, C., Poesen, J., Yong, L., **2005**. Gully erosion: Impacts, factors and control, *Catena*, 63, 132–153
- Valette, L., Chandesris, A., Mengin, N., Malavoi, J.-R., Souchon, Y., Wasson, J.-G., **2008**. *Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique*, 27 p.
- Vallverdú, J., Courty, M.-A., Carbonnel, E., Canals, A., Burjachs, F., **2001**. Les sédiments d'Homo Antecessor de Gran Dolina, (Sierra de Atapuerca, Burgos, Espagne). Interprétation micromorphologique des processus de formation et enregistrement paléoenvironnemental des sédiments. *L'Anthropologie*, 105(1), 45–69. doi:10.1016/s0003-5521(01)80005-4
- Van Gelder, P.H.A.J.M., Wang, W. and Vrijling, J.K., **2007**. Statistical estimation methods for extreme hydrological events, *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*, pp. 199-252.
- Van Grieken, R. E., Markowicz, A. A., **2002**. *Handbook of X-Ray Spectrometry* 2nd ed.; Marcel Dekker, New York, Vol. 29; ISBN 0-8247-0600-5
- Van Niekerk, H., Silberbauer, M.J., Malueke, M., **2014**. Geographical differences in the relationship between total dissolved and electrical conductivity in South African rivers. Technical note. În *Water SA*, 40 (1), 133-138.
- Vanacker et al., 2005, River channel response to short-term human-induced change in
- Vanmaercke, Matthias, Abraha, Amanuel, Poesen, J., Nyssen, Jan, Verstraeten, Gert, Deckers, Jozef, **2010**. Sediment dynamics and the role of flash floods in sediment export from medium-sized catchments: A case study from the semi-arid tropical highlands in northern Ethiopia. *Journal of Soils and Sediments*. 10. 611-627. 10.1007/s11368-010-0203-9.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., Cushing, C.E., **1980**. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 37, 130-137.
- Vanonckelen, S., Van Rompaey, A., **2015**. Spatiotemporal analysis of the controlling factors of forest cover change in the Romanian Carpathian Mountains, *Mountain Research and Development*, 35(4), pp. 338-350, 2015, <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-15-00014>.
- Varnes, D. J., **1978**. Slope movement types and processes. *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33, ISSN: 0360-859X.

- Varnes, D.J., **1984**, *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice*. IAEG Commission on Landslides, UNESCO, Paris, 63p.
- Vasiliniuc, S., **2011**. *Datarealuminiscentă a loessului din Româniautilizândfeldspați*. Résumé de thèse de doctorat, Université Babes – Bolyai, Cluj – Napoca & Université de Ghent, 56 p.
- Vâjay, K., **2014**. Hysteresis, In *Encyclopedia of Snow, Ice and Glacier, Part of the series Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 554-555, doi: 10.1007/978-90-481-2642-2\_252
- Vâlsan, G., **1914**. *Sur la morphologie de l'Oltenie (Roumanie)*, CR Etud geogr, 157, Paris.
- Velcea, V., **2002**. *Geografia fizică a României*, Edit. Universității Lucian Blaga, Sibiu.
- Velcea, V., Savu., A., **1982**. *Geografia Carpaților și Subcarpaților Românești*, Edit. Didactică și Pedagogică, București.
- Velcea, V.A., Costea, M., **2006**. *Geomorfologie Generală*. Editura Universității “Lucian Blaga”, Sibiu, Roumanie, 285p.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Demaree, G., Salles, C., **2006**. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research*, 111, D22109.
- Vespremeanu-Stroe, A., Zăinescu, F., Preoteasa, L., Tătui, F., Rotaru, S., Morhange, C., Stoica, M., Hanganu, J., Timar-Gabor, A., Cărdan, I., Piotrowska, N., **2017**. Holocene evolution of the Danube delta: An integral reconstruction and a revised chronology. *Marine Geology*, 388, 38-61. DOI: [10.1016/j.margeo.2017.04.002](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.04.002)
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L. T. H., McInnes, J., Roberts, A.M., **2012**. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138, 74–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
- Vincent, K.R., Bull, W.B., Chadwick, O.A., **1994**. Construction of a soil chronosequence using the thickness of pedogenic carbonate coatings. *Journal of Geological Education*, 42, 316-324.
- Viscara Rossel, R.A., Walwoort, D.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., **2006**. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. În *Geoderma*, 131, 59–75
- Vlăduț, A., **2004**. Excesul de precipitații în Câmpia Olteniei (1961-2000), *Analele Universității din Craiova, Seria Geografie*, vol. VII, Serie Nouă, pag. 57-62, Edit. Universitaria, Craiova.
- Vlăduț, A., Onțel, I., **2013**. Summer air temperature variability and trends within Oltenia Plain, *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic" SASA*.
- Vlăduț, A.Ș., **2006**. *Regimul precipitațiilor atmosferice în Oltenia*, These de doctorat, Universite de Bucarest. Faculte de Geographie, 209 p.
- Vogels, M., **2013**. *Effects of past and present mining on fine sediment geochemistry of floodplain soils, Horsefly River, BC, Canada*. Master Thesis, Utrech University, Faculty of Geosciences, Department of Physical Geography, 101p.
- Volk, M., Liersch, S., Schmidt, G., **2009**. Towards the implementation of the European Water Framework Directive? Lessons learned from water quality simulations in an agricultural watershed. *Land Use Policy*, 26, 580–588. doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.08.005
- Von Blanckenburg, F. **2006**, The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, 242, 224 – 239. DOI: doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.030
- Voulvoulis, N., Arpon, K.D., Giakoumis, T., **2017**. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment*, 575, 358–366.
- Walling, D. E., Zhang, Y., **2004**. Predicting slope-channel connectivity: a national scale approach, Sediment Transfer through the Fluvial System. *Proceedings of a symposium held in Moscow. August 2004*). *IAHS Publ.*, 288, 107 – 114.
- Walling, D.E., **2005**. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. În *Scientific Total Environment*, 344, 159–184
- Walling, D.E., He, Q., **1998**. The spatial variability of overbank sedimentation on river floodplains. *Geomorphology*, 24, 209-223.

- Walling, D.E., Moorehead P.W., **1989**. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: an overview. In *Hydrobiologia*, 176 (177), 125–149.
- Walling, D.E., Owens, P.N., Leeks, G.J.L., **1998**. The role of channel and floodplain storage in the suspended sediment budget of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Geomorphol.* 22, 225–242.
- Wallinga, J., **2002**. Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. *Boreas*, 31, 303–322.
- Wallinga, J., Murray, A.S., Duller, G.A.T., Tornqvist, T.E., **2001**. Testing optically stimulated luminescence dating of sand-sized quartz and feldspar from fluvial deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 617 – 630.
- Wallis, K.H., **2011**. Combining forecasts – forty years later, 18 p.
- Wang, G. C., Luo, Z. K., Wang, E. L. and Huang, Y., **2013**. Contrasting effects of agricultural management on soil organic carbon balance in different agricultural regions of China. *Pedosphere*, 23(6), 717–728.
- Ward, A., Smith, A., Caldwell, J., **1984**. Surface erosion and sediment control at open-cast mines in southern Africa. In *Challenges in African Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Harare Symposium)*, IAHS Publication, 144, 517-527.
- Wasson, R., Mazari, R.K., Starr, B.J., Clifton, G., **1998**, The recent history of erosion and sedimentation on the Southern Tablelands of southeastern Australia. *Geomorphology*, 24(4), 291-308, DOI: 10.1016/S0169-555X(98)00019-1
- Weber, R., Fripp, J., **2010**. *Understanding Fluvial Systems: Wetlands, Streams, and Flood Plains*, 25p.
- Webster, R., Oliver, M.A., **2007**. *Geostatistics for environmental scientists*, John Wiley & Sons, 308p.
- Wechsler, S. P., **2007**. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Science*, 11, 1481–1500.
- Weiner, E.R., **2008**. *Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide, 2nd Ed.* CRC Press: Boca Raton.
- Weiβ, A., Matouskova, M., Matschullat, J., **2008**. *Hydromorphological assessment within the EU-Water Framework Directive—trans-boundary cooperation and application to different water basins.* *Hydrobiologia*, 603, 53 – 72.
- Wester, T, Wasklewicz, T., Staley, D., **2014**. Functional and structural connectivity within a recently burned drainage basin. In *Geomorphology*, 206, 362–373.
- Wharton, G., Gilvear, D.J., **2007**. River restoration in the UK: Meeting the dual needs of the European union water framework directive and flood defence?. *International Journal of River Basin Management*, 5(2), 143–154.
- Whiting, P.J., Matisoff, G., Fornes, W., Soster, F.M., **2005**, Suspended sediment sources and transport distances in the Yellowstone River basin, *GSA Bulletin*, 117 (3-4), 515-529.
- Wilcock, P.R., **1992**. Flow competence: a criticism of a classic concept. In *Earth Surface Processes and Landforms 7*: 289-298.
- Wilkinson, S., Henderson, A., and Chen, Y., **2004**. *SedNet User Guide*. Client Report for the Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, CSIRO Land and Water, Canberra.
- Williams, G.P., **1978**. Bank-full discharge of rivers. *Water Resources Research*, 14(6), 1141–1154. doi:10.1029/wr014i006p01141
- Williams, G.P., **1989**. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111, 89-106.
- Williams, G.P., Wolman, M.G., **1984**. Downstream effects of dams on alluvial rivers, U.S. Geol., Survey, Prof. Paper, 1286, <https://doi.org/10.1002/rrr.3450010210>.
- Wilson, J. P., Gallant, J.C., **2000**. Digital terrain analysis. *Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), Terrain analysis: principles an applications.* Wiley, New York, 1 - 27.
- WMO, **2003**. *Guidelines on climate metadata and homogenization*, WMO/ TD 1185, Geneva, 52 p.
- Wohl, E Brierley, G., Cadol, D., Coulthard, T. J., Covino, T., Fryirs, K. A., Grant, G., Hilton, R. G., Lane, S. N., Magilligan, F. J., Meitzen, K. M., Passalacqua, P., Poepl, R. E., Rathburn, S. L., and Sklar, L. S., **2019**. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.4434>, <https://doi.org/10.1002/esp.4434>, dernier accès le 14.10.2019
- Wohl, E., **2017**, Connectivity in rivers. In *Progress in Physical Geography*, **41(3)**, 345–362

- Wohl, E., Angermeier, P.L., Bledsoe, B., Kondolf, G.M., Macdonnell, L., Merritt, D.M., Palmer, M.A., Poff, N.L., Tarboton, D., **2005**. River restoration. *Water Resources Research*, 41, 1 – 12.
- Wolcott, J., Church, M. **1991**. Strategies for sampling spatially heterogeneous phenomena; the example of river gravels. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 534-543.
- Wolman, M.G., Gerson, R., **1978**. Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 3, 189-208.
- Wolman, M.G., Miller, J.P., **1960**. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68, 54-74.
- Woodward, J.C., Walling, D.E., **2007**. Composite suspended sediment particles in river systems: their incidence, dynamics and physical characteristics. *Hydrological Process*, 21, 3601–3614.
- Wyźga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., Amirowicz, A., **2010**. A Method for the Assessment of Hydromorphological River Quality and its Application to the Czarny Dunajec River, Polish Carpathians. In *Cultural Landscapes of River Valleys A. Radecki-Pawlik, J. Hernik, Eds.*, Publishing House of the University of Agriculture in Krakow, 145 – 164.
- Xu, C.-Y., Singh, V.P., **2001**. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. In *Hydrological Processes*, 15, 305-319 p.
- Yang, C.T., Stall, J.B., **1974**. *Unit stream power for sediment transport in natural rivers*. University of Illinois at Urbana-Champaign Water Resources Center, RESEARCH REPORT NO. 88, 42 p.
- Yeshaneh, E., Eder, A., Blöschl, G., **2014**. Temporal variation of suspended sediment transport in the Koga catchment, North Western Ethiopia and environmental implications. *Hydrological processes*, 28, 5972–5984. DOI: 10.1002/hyp.10090
- Yibas, B., Novhe, O., Motlakeng, T., **2013**. Stream sediment geochemistry of the areas impacted by mining around Emalahleni (formerly known as Witbank), South Africa: Fingerprinting AMD potential point sources. In *Proceedings of the Annual International Mine Water Association Conference – "Reliable Mine Water Technology"*, 429-434.
- Young, P.C., **2011**. *Recursive Estimation and Time-Series Analysis*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, ISBN 978-3-642-21980-1, DOI 10.1007/978-3-642-21981-8, 495 p.
- Yousif, N., **2007**. *Geochemistry of stream sediment from the state of Colorado using NURE data*, ETD Collection for the University of Texas, El Paso, [paper AAI3273991](#)
- Yuan, Z., Yang, Y. **2003**. *Combining linear regression models: When and how? Statistics Preprints*. 117p.
- Yun-jia, W., Da-chao, Z., Da-jun, L., Yong-deng, L., Xing-feng, W., **2009**. Environment cumulative effects of coal exploitation and its assessment. In *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 1072-1080.
- Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., **2013**, *Romanian Danube River management: Impacts and perspectives*. Arnaud-Fassetta G, Masson E, Reynard E (eds) European continental hydrosystems under changing water policy. Friedrich Pfeil Verlag, München, 159–170
- Zaharia, L., **1999**. *Resursele de apă din bazinul râului Putna. Studiu de hidrologie*, Edit. Universității din București, 305 p.
- Zaharia, L., **2002**. *Régionalisation des débits de pointe des bassins versants de la courbure de l'Arc Carpatique (Roumanie)*, Lucrare de Diplomă, E.P.F.L. Lausanne;
- Zaharia, L., Beltrando, G., **2007**. Variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie dans la région de la Courbure de l'Arc Carpatique: étude par Analyse en Composantes Principales. În *Revue Roumaine de Géographie*, Toms 47 – 48, 175 – 184.
- Zaharia, L., Beltrando, G., Nedelcu, G., Boroneant, C., Ioana-Toroimac, G., **2006**, *Les inondations de 769 2005 en Roumanie*. En Beltrando G, Madelin M, Quénot H (eds) Actes du XIXème Colloque 770 International de Climatologie, Epernay (France), 6–9 Septembre 2006, 557–562.
- Zaharia, L., Costache, R., Prăvălie, R., Minea, G., **2015**. Assessment and mapping of flood potential in the Slănic Catchment in Romania. *Journal of Earth Sciences*, vol. 124.
- Zaharia, L., Grecu, F., Ioana-Toroimac, G., Chirilă, G., **2011**, *Sediment transport and river channel 772 dynamics in Romania—variability and control factors*. En Manning AJ (ed) Sediment transport in aquatic environments. TECH, Rijeka, 293–316.

- Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., Moroşanu, G.A., Gălie, A.C., Moldoveanu, M., Čanjevac, I., Belleudy, P., Plantak, M., Buzjak, N., Bočić, N., Legout, C., Bigot, S., Ciobotaru, N., **2018**. Review of national methodologies for rivers' hydromorphological assessment: A comparative approach in France, Romania, and Croatia. *Journal of Environmental Management*, 217, 735-746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.017>.
- Zawisza, B., Pytlakowska, K., Feist, B., Polowniak, M., Kita, A., Sitko, R., **2011**. Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques: A review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26(12), 2373-2390, DOI: 10.1039/C1JA10140D
- Zăvoianu, 1967 F.J., Mudd, S., Attal, M., Milodowski, D., Grieve, S., **2016**. *The relationship between drainage density, erosion rate, and hilltop curvature: Implications for sediment transport processes*, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JF003747>, dernier acces le 14.10.2019
- Zăvoianu, I., **1978**. *Morfometria bazinelor hidrografice*, Edit. Academiei Republicii Socialiste România, 174 p.
- Zăvoianu, I., **1985**. *Morfometry of drainage basins*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Zăvoianu, I., **1999**. *Hidrologie*, Edit. Fundaţiei Romania de Măine, Bucureşti, 319 p.
- Zăvoianu, I., **2006**. *Hidrologie*, Edit. Fundaţiei România de Măine, 256 p.
- Zăvoianu, I., Herişanu, G., Vartolomei, F., Cruceru, N., **2010**. Relaţii între scurgerea de aluviuni ca fenomen de risc pentru colmatarea lacurilor de acumulare şi factorii de mediu. *Limnology*, 44-49.
- Zhang, J.F., Zhou, L.P., Yue, S.Y., **2003**. Dating fluvial sediments by optically stimulated luminescence: selection of equivalent doses for age calculation. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1123 – 1129.
- Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., Wei, X., Ning, D., Hou, Y., Liu, S., **2017**. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*, 546, 44–59. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.040>
- Zhu, Z., Zheng, A., **2018**. Fast determination of yttrium and rare earth elements in seawater by inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry after Online Flow Injection Pretreatment. *Molecules*, 23(2), 489 p. DOI:<https://doi.org/10.3390/molecules23020489>
- Zou, J., Yang, Y., Jia, S., **2019**. The sources and biogeochemical cycling of carbon in the Wudalianchi UNESCO Geopark volcanic system in Northeast China, *Environ Sci Pollut Res*, 26(3), 2918-2928. doi: 10.1007/s11356-018-3840-y.
- Zvoleff, A., An, L., **2014**. Analyzing Human–Landscape Interactions: Tools That Integrate. *Environmental Management*, 53(1), 94-111. doi: 10.1007/s00267-012-0009-1.
- \*\*\***1981**. *Dictionnaire de l'eau de Québec*, Office de la langue française, xiv, 544 p.
- \*\*\***1982**, *Carte topographique de la Roumanie*, Département de Topographie Militaire, 2eme Edition, (échelle 1:25,000), Ministère de la Défense Nationale, R.S.R., Bucarest,
- \*\*\***1990**, Hydrologic Engineering Centre, HEC-2, Water Surface Profiles, User's Manual.
- \*\*\***1992**, Aquaproiect. *Atlasul cadastrului apelor din România* [Atlas cadastral des eaux de la Roumanie], Parties I, II. Ministère de l'Environnement, Aquaproiect S.A., Bucarest.
- \*\*\***1992**. Atlasul Cadastrului Apelor din România, Partea 1 – Date morfo-hidrografice asupra reţelei hidrografice de suprafaţă, Ministerul Mediului, Bucureşti: 694p.
- \*\*\***1998**, ICCP, The new vitrinite classification (ICCP System 1994), *Fuel*, 77(5), 349-358.
- \*\*\***1998**, International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), *The new vitrinite classification (ICCP System 1994)*. In *Fuel*, 77(5), 349 – 358.
- \*\*\***2000**, Institutul de Geografie al Academiei Române, Observaţii geomorfologice în ulucul submontan dintre Jiu si Gilort. În *Gorjul geografic*. Vol II, Târgu Jiu, 117 – 134.
- \*\*\***2000**, International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), (2000), *The new inertinite classification (ICCP System 1994)*. In *Fuel*, 80, 459 – 471.
- \*\*\***2000**, Hidroelectrica, *Colmatarea lacului Vădeni – sursă de risc pentru locuitorii municipiului Târgu-Jiu*, 9p.
- \*\*\***2001**, ICCP, The new inertinite classification (ICCP System 1994), *Fuel*, 80, 459 – 471.
- \*\*\***2002**, ESRI, , Arch Hydro - GIS for Water Resources, 2 p.
- \*\*\***2004**, Compania Naţională a Huilei – S.A. Petroşani, *Dezvoltarea durabilă a producţiei de ulei în condiţiile impuse de aderarea la U.E.*, 7 p.



- \*\*\*2004, Radiometer Analytical, *Conductivity – Theory and Practice*, 50 p.
- \*\*\*2006, Agence d'Eau Loire – Bretagne, Le prélèvement d'échantillons en rivière. Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques, 134 p.
- \*\*\*2007, Agence de l'eau Seine-Normandie, *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*, 64 p.
- \*\*\* 2007, BS EN 15309, *Characterization of waste and soil. Determination of elemental composition by X-ray fluorescence*, 7p.
- \*\*\*2008, *Clima României*. Administrația Națională de Meteorologie, Editura Academiei Române, București, 365 p.
- \*\*\*2008, Hydrologic Engineering Centre, HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual
- \*\*\*2009, ISO 7404-2, *Methods for the petrographic analysis of coals – Part 2: Methods of preparing coal samples*, 7p.
- \*\*\*2009, ISO 7404-3, *Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite – Part 3: Method of Determining Maceral Group Composition*. International Organization for Standardization.
- \*\*\*2009, ISO 7404-5, *Preview Methods for the petrographic analysis of coals -- Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite*
- \*\*\* 2010, ISO 562, *Hard coal and coke - Determination of volatile matter*, 8p. DOI: <https://doi.org/10.3403/30216122>
- \*\*\* 2010, ISO 1171, *Solid mineral fuels - Determination of ash*, ISO Switzerland, 4p.
- \*\*\*2009. S.C. Hidroelectrica S.A., *Colmatarea lacului Vădeni – sursă de risc pentru locuitorii municipiului Tg-Jiu*, Raport tehnic, 9 p.
- \*\*\*2010, Administrația Bazinală de Apa Jiu, *Planul de management al bazinului hidrografic Jiu* [Plan de gestion du bassin versant de la rivière Jiu], 406 p.
- \*\*\*2010, Federal Emergency Management Agency (2010), *Regional Guidance for Floodplain Habitat Assessment and Mitigation*, 36 p.
- \*\*\*2011 – 2013, Programme d'action du bassin Rhône-Méditerranée pour la pollution par les PCB, disponible à [http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/pollutions/pollution\\_PCB/index.php](http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/pollutions/pollution_PCB/index.php). Dernier accès : 10.11.2019
- \*\*\*2012, Aquaproiect, *Planul pentru Prevenirea, Protecția și Diminuarea Efectelor Inundațiilor în Bazinul Hidrografic Jiu* [Plan pour la prevention, la protection et la diminution des effets des inondations dans le bassin versant de la rivière Jiu], 149 p.
- \*\*\*2012, Horiba Scientific, *A Guidebook To Particle Size Analysis*, 32 p. Available at [https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/PSA\\_Guidebook.pdf](https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/PSA_Guidebook.pdf)
- \*\*\*2012, ICPDR, *Guiding Principles on Sustainable Hydropower Development in the Danube Basin*, 40 p.
- \*\*\*2012, OMM, Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, 18 p.
- \*\*\*2013, (GIEC) IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Disponibil la adresa: <http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/maly/la-directive-cadre-europeenne-sur-leau>.
- \*\*\*2013a, ICPDR, *Assessment Report on Hydropower Generation in the Danube Basin*, 128 p.
- \*\*\*2013b, ICPDR, *Hydropower case studies and good practice examples. Annex to "Guiding Principles on Sustainable Hydropower Development in the Danube Basin"*, 35 p.
- \*\*\*2014, Administrația Națională "Apele Române", Administrația Bazinală de Apa Jiu Craiova, S.H.I. Petroșani, , *Sistemul Hidrotehnic Independent Petroșani* [Le système hydrotechnique indépendant de Petroșani], 9 p.
- \*\*\*2014, CWEA, P-20VI – Méthode pour le prélèvement de sédiments dans les cours d'eau non navigables, 4 p. 20-P-20-Prélèvements-de-sédiments
- \*\*\*2016, Administrația Bazinală de Apă Jiu, *PLANUL DE MANAGEMENT AL BAZINULUI HIDROGRAFIC JIU. CICLUL Al II – lea: 2016 – 2021* [Plan de gestion du bassin versant de la rivière Jiu. Le IIeme cycle : 2016 - 2021], 313 p.
- \*\*\*2016, *Planul Național de Management actualizat aferent porțiunii din bazinul hidrografic internațional al fluviului Dunărea care este cuprinsă în teritoriul României*, aprobat prin Hotărârea nr. 859/2016.
- \*\*\*2017, ISO 5667-12, Water quality — Sampling —Part 12: Guidance on sampling of bottom sediments from rivers, lakes and estuarine areas, 47 p.
- \*\*\*2017. AZO Materials, Different Sieving Methods for Varying Applications, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\*2019, JoVE Science Education Database, Environmental Science. Carbon and Nitrogen Analysis of Environmental Samples. JoVE, Cambridge, MA
- \*\*\*2019. Bed Load and Suspended Load. Sediment Transport Formulas, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\*2008. Administrația Națională de Meteorologie, *Clima României*, Edit. Academiei Române, București, 365 p.

- \*\*\*Environment Canada. Informations sur la conductivité. Disponibil la: <http://www.ec.gc.ca/eaudouce-freshwater/default.asp?lang=en&n=61A967F4-1>
- \*\*\*U.S. E.P.A, *Conductivity*. Disponibil la <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms59.cfm>
- \*\*\*U.S. Environmental Protection Agency, (?), What is Acid Mine Drainage. Available at <http://www.sosbluewater.org/epa-what-is-acid-mine-drainage%5B1%5D.pdf>
- \*\*\*US methods to calculate map accuracy. Disponibil la: <http://articles.extension.org/pages/19014/calculating-your-map-accuracy-using-us-national-map-accuracy-standards>
- \*\*\* Agence Environnementale Européenne - DPSIR <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/dpsir>  
Dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* ASTM International, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* CRAN R-project, Package 'flexmix', le 19.02.2019, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* CRAN R-project, Package 'glm2', 11.08.2018, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* Energie de relief vs. Profondeur de fragmentation - <http://harti.co/despre/energia-de-relief-vs-adancimea-fragmentarii/>, Dernier accès le 5 octobre 2019
- \*\*\* European Climate Assessment & Dataset - <http://www.ecad.eu/>
- \*\*\* Evolution 2D de la bande active de la Haute Prahova (Roumanie) durant les 150 dernières années
- \*\*\* Glossaire d'hydrologie <http://www.glossaire.eaufrance.fr/> Dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* Loi n° 46/2008 établissant le Code Forestier de la Roumanie, republiée le 12 août 2015. Disponible en roumain en suivant le lien: <http://legislatie.just.ro/Public/DetaliuDocumentAfis/184301>, dernier accès le 14.10.2019.
- \*\*\* Propagation d'une onde de crue, Propagation d'une onde de crue en rivière, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* *QGIS online user manual for Stream Network Analysis tools*: [http://docs.qgis.org/2.8/de/docs/user\\_manual/processing\\_algs/taudem/stream\\_network\\_analysis\\_tools.html](http://docs.qgis.org/2.8/de/docs/user_manual/processing_algs/taudem/stream_network_analysis_tools.html)
- \*\*\* Quick-R by Data Câmp, Generalized Linear Models, dernier accès le 14.10.2019
- \*\*\* *TauDEM Toolbox: Stream Network Analysis Toolset*. Available at: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/help53/StreamNetworkAnalysisToolsetOverview.htm>
- \*\*\* Administrația Bazinală de Apă Jiu, *Raport - Evaluarea preliminară a riscului la inundații* [Rapport – Evaluation préliminaire du risque aux inondations], 36 p.
- \*\*\* Administration Nationale des Eaux de la Roumanie, *Memoriu de Evaluare de Mediu (SEA) pentru „Planul pentru Prevenirea, Protecția și Diminuarea Efectelor Inundațiilor în Bazinul Hidrografic JIU”* [Memoire d'évaluation environnementale (SEA) pour „Le plan pour la prevention, la protection et la diminution des effets des inondations dans le bassin versant de la rivière Jiu], 220 p.
- \*\*\* Administration Nationale des Eaux de la Roumanie, **2016**, Plan de gestion du bassin versant de la rivière Jiu, Roumanie, 313p.

## Sources cartographiques:

- \*\*\*, **1963**, *Studii de Hidrologie (VII). Probleme de hidrometrie* Comitetul de Stat al Apelor. Institutul de Studii si Cercetari Hidrotehnice, Bucuresti, 134 p.
- \*\*\*, **1966**, *Studii de Hidrologie (XV). Monografia hidrologica a bazinului hidrografic al raului Jiu*. Comitetul de Stat al Apelor. Institutul de Studii si Cercetari Hidrotehnice, Bucuresti, 198 p.
- \*\*\*, **1970**, *Apele minerale din județele Alba, Arad, Caras-Severin, Dolj, Gorj, Hunedoara, Mehedinți, Sălaj, Sibiu, Timiș*, 528 p.
- \*\*\*, **1971**, *Harta de sol a RSR, sc. 1:200.000 - Foaia Craiova*, Edit. Comitetul Geologic București – ICPA.
- \*\*\*, **1971**, *Piemontul Getic. Studiu de geografie economică*, 329 p, 82 fig, Edit Academiei, București.
- \*\*\*, **1971**, *Râurile României – Monografie hidrologică*, I.M.H., București
- \*\*\*, **1974**, *Harta de sol a RSR, sc. 1:200.000 - Foaia Slatina*, Edit. Comitetului Geologic București, ICPA.
- \*\*\*, **1975**, *Harta de sol a RSR, sc. 1:200.000 - Foaia Pitești*, Edit. Comitetul Geologic București, ICPA.
- \*\*\*, **1979**, *Harta de sol a RSR, sc. 1:200.000 - Foaia Orăștie*, Edit. Comitetul Geologic București, ICPA.
- \*\*\*, **1979**, *Harta de sol a RSR, sc. 1:200.000 - Foaia Târgu Jiu*, Edit. Comitetul Geologic București, ICPA.
- \*\*\*, **1983**, *Geografia României, vol. I, Geografie fizica*, Edit. Academiei, Bucuresti.

- \*\*\*, **1992**, *Atlasul Cadastrului Apelor din România, Partea I, Date morfo-hidrografice asupra rețelei hidrografice de suprafață*, Ministerul Mediului.
- \*\*\*, **1992**, *Geografia României, IV Regiunile pericarpate*, Edit. Academiei Române, București.
- \*\*\*, **1995 – 2018**, *Types of soil erosion*. Queensland Government. Environment, land and water, 7 p. Disponibil la: <https://www.qld.gov.au/environment/land/soil/erosion/types>
- \*\*\*, **1999**, *The River Law with Commentary By Article. Legal Framework for River and Water Management in Japan*. River Bureau, Ministry of Construction, JAPAN, 248 p.
- \*\*\*, **2004**, *Dezvoltarea durabilă a producției de huiă în condițiile impuse de aderarea la U.E.*, , Compania Națională a Huilei – S.A.
- \*\*\*, **2006**, Gully erosion. In *facts land series. Natural Resources and Water. Managing Queensland's natural resources...for today and tomorrow*, 4p.
- \*\*\*, **2007**, *Strategia de dezvoltare locală a microregiunii Valea Jiului* (coord. Adrian Mariciuc).
- \*\*\*, **2008**, *Caracteristicile regimului hidrologic al râurilor din județul Gorj*, Raport SGA Gorj, 66 p.
- \*\*\*, **2008**, *Clima României*, Edit. Acad Române, ANM, București.
- \*\*\*, **2009**, *Construction des courbes de tarage Site atelier de la baie du Robert*, Unité de Recherche « Agriculture et espace insulaire », 58 p.
- \*\*\*, **2012**, *Planul de prevenire, protecție și atenuare a efectelor inundațiilor în bazinul Jiului*. Administrația Națională "Apele Române", București.
- \*\*\*, *Memorii de prezentare pentru: Construire „balastiera – zona poligon Cernele” - municipiul Craiova, județul Dolj, și „Balastiera Mofleni” - municipiul Craiova, județul Dolj.*
- \*\*\*, *Studiu de evaluare adecvată*, realizare balastieră în comuna Podari, jud. Dolj.
- 210–VI–NEH, **2007**, Technical Supplement 13A. *Guidelines for Sampling Bed Material*, 14 p.

## Webographie:

- Agence Environnementale Européenne - DPSIR <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/dpsir> Dernier accès le 14.10.2019
- An Introduction for the Student and Practitioner, second edition, Springer <https://www.springer.com/us/book/9783642219801>
- ASTM International, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, dernier accès le 14.10.2019, <https://www.astm.org/Standards/D6913>
- AZO Materials, Different Sieving Methods for Varying Applications, **2017**, dernier accès le 14.10.2019, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14339>
- Base de données ROCADA, <https://www.pangaea.de/user/login.php?referer=https%3a//hs.pangaea.de/Maps/rocada/ROCADA.zip> Dernier accès le 14.10.2019
- Bauder et Sigler, **2017**, TDS Fact Sheet, [https://web.archive.org/web/20150429145631/http://waterquality.montana.edu/docs/homeowners/tds\\_fact\\_sheet.shtml](https://web.archive.org/web/20150429145631/http://waterquality.montana.edu/docs/homeowners/tds_fact_sheet.shtml), dernier accès le 14.10.2019
- Bed Load and Suspended Load. Sediment Transport Formulas, dernier accès le 14.10.2019, <http://www.tvrl.lth.se/fileadmin/tvrl/files/vvr176/lecture15.pdf>
- CRAN R-project, Package 'flexmix', le 19.02.2019 - <https://cran.r-project.org/web/packages/flexmix/flexmix.pdf>, Dernier accès le 14.10.2019
- CRAN R-project, Package 'glm2', 11.08.2018 - <https://cran.r-project.org/web/packages/glm2/glm2.pdf>. Dernier accès le 14.10.2019
- Directive « Inondations » (2007/60/CE) du Parlement Européen et du Conseil, **2007** - <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX:32007L0060> Dernier accès le 14.10.2019
- Directive-cadre « Eau » (DCE) du Parlement Européen et du Conseil, **2000** <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:32000L0060>, Dernier accès le 14.10.2019

Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, TD 5. Onde cinématique - [http://lhe.epfl.ch/cours/masterGC/iber\\_5.pdf](http://lhe.epfl.ch/cours/masterGC/iber_5.pdf).  
Dernier accès le 14.10.2019

Energie de relief vs. Profondeur de fragmentation - <http://harti.co/despre/energia-de-relief-vs-adancimea-fragmentarii/>, Dernier accès le 5 octobre 2019

European Soil Data Centre (ESDAC), <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/>, European Commission, Joint Research Centre.  
Dernier accès le 24.09.2019

European Climate Assessment & Dataset - <http://www.ecad.eu/>

Evolution 2D de la bande active de la Haute Prahova (Roumanie) durant les 150 dernières années,  
<https://journals.openedition.org/geomorphologie/7988>

Glossaire d'hydrologie <http://www.glossaire.eaufrance.fr/> Dernier accès le 14.10.2019

Glossaire d'hydrologie UNESCO <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDRO.HTM> Dernier accès le 14.10.2019

How to take a sample for luminescence dating - <https://www.usu.edu/geo/luminlab/how2osl.pdf>. Dernier accès : 5 juin 2019

[http://hydrologie.org/THE/PARIS\\_ANGUELA.pdf](http://hydrologie.org/THE/PARIS_ANGUELA.pdf)

<http://pp.ige-grenoble.fr/pageperso/hingray/PAGES/Publications.html>

[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1948\)59\[463:COTGR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1948)59[463:COTGR]2.0.CO;2)

<https://pubs.usgs.gov/unnumbered/70039077/report.pdf>

Hydrologie – Onde de crue, dernier accès le 14.10.2019, <https://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICONDE.HTM>

Landauer (OSL Technology Principle) - <https://www.landauer.eu/knowledge-center/learn-more/osl-technology-principle/>. Dernier accès: 5 juin 2019

Landscape connectivity in Andean ecosystems  
[http://wpg.forestry.oregonstate.edu/sites/wpg/files/seminars/05\\_Vanackeretal.pdf](http://wpg.forestry.oregonstate.edu/sites/wpg/files/seminars/05_Vanackeretal.pdf), dernier accès le 14.10.2019

Le mouvement des sédiments, dernier accès le 14.10.2019,  
<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/hym/11/mouv.htm>

Le transport des sédiments, dernier accès le 14.10.2019, [http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.pintomartins\\_d&part=154405](http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.pintomartins_d&part=154405)

Loi n° 46/2008 établissant le Code Forestier de la Roumanie, republiée le 12 août 2015. Disponible en roumain en suivant le lien: <http://legislatie.just.ro/Public/DetaliuDocumentAfis/184301>, dernier accès le 14.10.2019.

Page web de l'Administration du Bassin versant de la rivière Jiu <http://www.rowater.ro/dajiu/default.aspx> Dernier accès le 14.10.2019

Page web de l'Agence ONU pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO), dernier accès le 14.10.2019 <http://www.fao.org/3/T0848E/t0848e-10.htm>

Plan d'action du bassin Rhône-Méditerranée pour la pollution par les PCB- SDAGE Rhône-Méditerranée 2010-2015, Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés, [http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/PCB/sediments/Recommandations-sediments-V2-0d\\_sept2013.pdf](http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/PCB/sediments/Recommandations-sediments-V2-0d_sept2013.pdf). Dernier accès le 14.10.2019

Portail pour les données d'emploi et de couverture du terrain Corine Land Cover - <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> Dernier accès le 14.10.2019

Propagation d'une onde de crue, Propagation d'une onde de crue en rivière,  
<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/914>, dernier accès le 14.10.2019

*QGIS online user manual for Stream Network Analysis tools:*  
[http://docs.qgis.org/2.8/de/docs/user\\_manual/processing\\_algs/taudem/stream\\_network\\_analysis\\_tools.html](http://docs.qgis.org/2.8/de/docs/user_manual/processing_algs/taudem/stream_network_analysis_tools.html)

Quick-R by Data Camp, Generalized Linear Models - <https://www.statmethods.net/advstats/glm.html>. Dernier accès le 14.10.2019

Rivière Ibie, Transit sédimentaire et possibilités d'action - <https://www.saint-maurice-d-ibie.fr/ressources/riviere-ibie-fonctionnement-entretien-FR-223.pdf?1530101283>. Dernier accès le 14.10.2019

SDAGE Rhône-Méditerranée, 2010-2015, Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés, dernier accès le 14.10.2019

Site de l'Institut National de Statistique, <http://statistici.INS.ro:8077/tempo-online/#/pages/tables/INS-table>, Dernier accès le 5 octobre 2019

Site web de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE), dernier accès le 20.10.2019  
<https://www.eea.europa.eu/fr>

Source du code R pour plotter d'un diagramme climatique Walter \ & Lieth d'une station.  
<https://rdrr.io/cran/climatol/man/diagwl.html> Dernier accès le 14.10.2019

Statistical Innovations – Tutorial 3. Obtaining Predictions from a 2-class Regression -  
<https://www.statisticalinnovations.com/wp-content/uploads/XLCCRtutorial31.pdf> .Dernier accès le 14.10.2019

Tableau périodique des éléments, <https://www.ptable.com/?lang=fr>, dernier accès le 14.10.2019

TauDEM Toolbox: Stream Network Analysis Toolset. Disponible a:  
<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/help53/StreamNetworkAnalysisToolsetOverview.htm>

Transport et dépôt des sédiments, dernier accès le 14.10.2019

Université de Picardie Jules Verne, Les dépôts continentaux - <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-5.htm>. Dernier accès le 14.10.2019

Water notes for river management, [https://www.water.wa.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0013/3163/85474.pdf](https://www.water.wa.gov.au/_data/assets/pdf_file/0013/3163/85474.pdf), dernier accès le 14.10.2019

World Nuclear Association - <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx>. Dernier accès: 4 juin 2019



# Annexes

- Figure A.1.** Carte géologique du bassin de la rivière Jiu. Feuilles de Craiova, Turnu Severin, Calafat – Bechet, Orăștie, Târgu Jiu, Baia de Aramă, échelle 1:200.000
- Tableau A.2.1.** Résultats du test Mann-Kendall pour la tendance des températures moyennes mensuelles
- Tableau A.2.2.** Résultats du test Mann-Kendall pour la tendance des températures maximales mensuelles
- Tableau A.2.3.** Résultats du test Mann-Kendall pour la tendance des températures minimales mensuelles
- Tableau A.3.1.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Bechet selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.2.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Craiova selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.3.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Obîrșia Lotrului selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.4.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Padeș selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.5.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Parâng selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.6.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Petroșani selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.7.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Târgu Jiu selon le critère de Hellmann
- Tableau A.3.8.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Târgu Logrești selon le critère de Hellmann
- Figure A.4.** Schéma de la réalisation et représentation de la carte de la densité du drainage par la méthode proposée
- Figure A.5.1.** Barrages et réservoirs dans le bassin de la rivière Jiu. Synthèse de différents sources média et documents techniques (pour certaines catégories, il n'a pas été possible de trouver des informations sur les barrages et réservoirs concernés)
- Figure A.6.1.** Le schéma synoptique des aménagements fonctionnels dans le bassin de la rivière Jiu (adapté selon ABA Jiu sans les informations sur les aménagements complexes en construction entre Livezeni et Bumbesti et entre Valea Sadului et Vădeni)
- Tableau A.7.1** Les stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et leur état de fonctionnement
- Tableau A.7.2** Schéma topologique des stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (en fonction ou nonfonctionnelles)
- Figure A.8.1.** Exemples supplémentaires des ruptures de données dans les séries des débits liquides
- Figure A.9.1.** Les caractéristiques des crues horaires aux stations hydrométriques de la rivière Jiu
- Figure A.9.2.** Les caractéristiques des crues horaires aux stations hydrométriques des affluents de la rivière Jiu
- Figure A.10.1.** Le temps de propagation des crues horaires
- Figure A.10.2.** Nombre des crues et la variation des vitesses de propagation
- Figure A.11.1.** D'autres relations débit liquide (Q) – débit des alluvions en suspensions (R) gouvernées par les activités minières en amont dans la période 2001 - 2010
- Figure A.11.2.** Indice de stockage  $S_{adu - Rovinari} = R_{mensuelSadu} / R_{mensuelRovinari}$  (si supraunitaire, c'est le stockage intermédiaire des réservoirs Vădeni et Târgu Jiu et l'effet de la diminution de la pente sur le secteur subcarpatique en aval des gorges ; si un rapport subunitaire, c'est une relation normale amont-aval, où presque toute la quantité des alluvions de l'amont passe en aval)
- Figure A.12.1.** Résultats de la modélisation GR4J des débits liquides de la station hydrométrique de la Călnic, rivière Tismana, entre 1998 et 2004
- Figure A.12.2.** Résultats de la modélisation GR4J des débits liquides de la station hydrométrique de la Iasi - Gorj, rivière Amaradia Pietroasă, entre 1998 et 2014
- Figure A.13.1.** Matrice de classification type « charte de chaleur » des contributions potentielles de **tous** les s.h./b.v. analysés pour chaque crue, selon les résultats de l'**indice 1** (les crues sont ordonnées selon leur importance selon l'indice en cause)
- Figure A.13.2.** Matrice de classification type « charte de chaleur » des contributions potentielles des s.h./b.v. analysées pour chaque crue à chaque niveau d'analyse, selon les résultats de l'**indice 1** (les crues sont ordonnées en fonction de leur importance selon l'indice en cause)
- Figure A.13.3.** Matrice de classification type « charte de chaleur » des contributions potentielles de **tous** les s.h./b.v. analysés pour chaque crue, selon les résultats de l'**indice 5** (les crues sont ordonnées selon leur importance selon l'indice en cause)

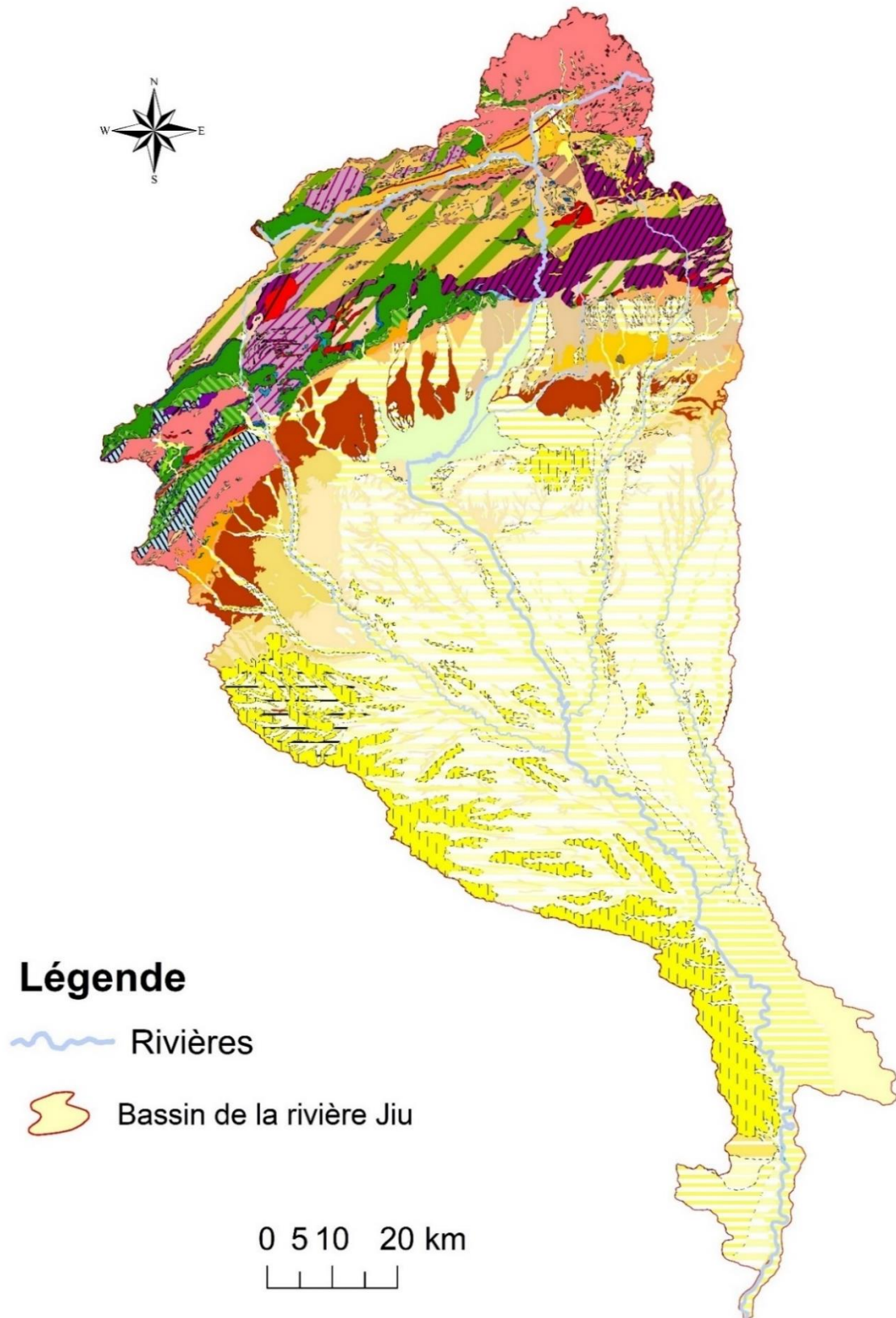
**Figure A.13.4.** Matrice de classification type « charte de chaleur » des contributions potentielles des s.h./b.v. analysées pour chaque crue à chaque niveau d'analyse, selon les résultats de l'**indice 5** (les crues sont ordonnées en fonction de leur importance selon l'indice en cause)

**Figure A.14.1.** Les éléments chimiques (métaux lourds et lanthanides) analysés par les méthodes géochimiques dans les échantillons de sédiments fins

**Annexe A.15.1.** Résultats des analyses en ce qui concerne la teneur en carbone totale (TTC) et la densité des grains de charbon (DGC) par l'analyse d'image

**Annexe A.15.2.** Indices colorimétriques des échantillons de houille et lignite

# Annexe 1



*Annexe A.1. Carte géologique du bassin de la rivière Jiu. Feuilles de Craiova, Turnu Severin, Calafat – Bechet, Orăştie, Târgu Jiu, Baia de Aramă, échelle 1:200.000*

## Légende géologie

(continuation)

### QUATERNAIRE

	qp1/2	Sable, gravier, galets et dépôts de loess
	qp2-qp3	Dépôts de loess
	qp2/2-qp3	Dépôts de loess
	qh2	Gravier, sable, argiles
	qh1	Sable, gravier
	qh	Graviers, sable
	qp3	Graviers, sable
	qp3/3	Sable, gravier, argile rouge et dépôts de loess
	qp2/3	Gravier, sable
	qp1/3	Sable, gravier
	qp1	Gravier, sable, argiles
	Q	Sable, gravier, argiles









### NEOGENE

	pn	Argiles marneuses, sable, gravier
	qp1/1	Gravier, sable, argiles
	vh-bs1	Marnes, sable, grès, conglomérats
	m	Sable, Gravier, argiles
	p	Grès, marnes, marnes sableuses
	lv	Sable, marnes, lignite
	sm	Gravier, sable, marnes
	bs2-m	Argiles marneuses
	dc	Sable, argiles, charbon
	vh+bs1	Grès, marnes, conglomérats, sable
	to	Conglomérats, calcaires, gypse, sel, tufs, grès
	bd	Conglomérats, grès, argiles





### PALEOGENE

	Pg3	Conglomérats, grès, argiles marneuses
	ch-aq	Argiles, marnes, grès, schistes disodiques, charbon
	Pg2	Grès siliciques, conglomérats, schiste disodique, marnes bitumineuses, ménilites
	rp	Argiles, sable, grès, marno-calcaires bitumineuses, strates de Țicu, Bizușa, Ileanda







## CRETACIQUE

	tu-sn	Conglomérats, grès, argiles avec galets (Wildflysch)
	sn	Brèches, agglomérats, schists
	vr+cm	Marnes et argiles rouges (zone du flysch), conglomérats et grès (sinclinal Hăghimaş), schists raillés avec tufites
	al-cm	Marnocalcaires, argiles, grès (strates de Nadanova)
	J3-ap	Calcaires, calcaires oolitiques, microconglomérats, grès
	th+ne	Marnocalcaires, marnes, grès
	K2	Conglomérats, grès (flysch)
	al+cm	Marnocalcaires, argiles, grès (strates de Nadanova)



## JURASIQUE

	J3	Calcaires massifs, calcaires stratifiés
	th-ap	Marnocalcaires, grès, conglomérats, dolérites, spilites
	J2	Microconglomérats, calcaires sableux et marneux, grès quartzeux
	J1	Conglomérats, grès avec intercalations d'argiles charbonneuses



## PROTEROZOIQUE-Pz

	P	Schists argileux, filites noirs, conglomérats, grès tufacés
	P1	Conglomérats, grès, schists argileux rouges, porphyres agglomérés, piroclastiques, riolitiques et bazaltiques
	S	Péridotites serpentinisées, schists philitiques, calcaires, quartzites graphiteuses
	Pz	Schists épimétamorphiques de la série de Repedea, Série de Tuljşa et la Série de Vărmaga
	Pz1	Quartzites, philites sériciteuses (Quartzites de Priopcea)
	Pts - Pz	Schists épimétamorphiques de la série sédimentogen - vulcanogen - acides; Série de Arada, Série de Biharia, Série de Codru, schists cristalins épimétamorphiques du domaine danubien









## MAGMATITES Ng-Q

	$\alpha$	Andésites
	$\beta$	Bazaltes



## MAGMATITES Mz

	$\beta'$	Dolérites
	$\beta_{cr}$	Dolérites (diabases)

## MAGMATITES Mz-Pz

	$\beta(P-Mz)$	Roches ultrabasiques
	$\gamma$	Granites
	$\beta'\beta''(J3-K)$	Dolérites - Spilites (J3, K)
	$\gamma Pz$	Granite (Pz), Granitoides (Pz)
	$\iota$	Aplites
	$\epsilon$	Pegmatites
	$\gamma$	Granites (Pz, Pc)
	$M\epsilon$	Pegmatites












## MAGMATITES Pz

	$\gamma\delta Pz1$	Granodiorites
	$\eta Pz$	Dacites (Pz)

## MAGMATITES PRECb-Pz

	$\lambda$	Lamprophyres
---	-----------	--------------

## ROCHES METAMORPHIQUES

	E	Eclogites
	MS	Séripentinites
	Ma	Micaschistes et paragnaises
	Mb	Migmatites métablastiques
	Mt	Migmatites métatétiques
	Mv	Filites, schists séricito-chloritiques
	a	Amphibolites
	c	Calcaires cristalins
	d	Dolomites cristalines
	ft	Roches verts tufogènes
	gf	Schists graphiteux



## Annexe 2

**Tableau A.2.1. Résultats du test Mann-Kendall pour la tendance des températures moyennes mensuelles**

Station Météorologique		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Bechet	Test Z	1.25	0.87	1.68	0.94	1.59	2.95	3.77	3.35	0.05	0.35	-0.45	-0.11
	Signif.			+			**	***	***				
Craiova	Test Z	1.50	1.07	1.63	1.13	1.70	3.18	3.57	3.31	-0.47	0.54	-0.04	0.49
	Signif.					+	**	***	***				
Obîrșia Lotrului	Test Z	1.40	0.59	0.70	1.31	2.29	3.12	4.03	3.63	-0.59	0.51	0.35	1.71
	Signif.					*	**	***	***				+
Padeș	Test Z	1.54	0.84	1.44	1.57	1.94	3.22	3.80	3.69	-0.19	0.85	-0.50	0.24
	Signif.					+	**	***	***				
Parâng	Test Z	1.94	0.53	1.16	1.56	2.37	3.28	4.20	3.84	-0.33	0.99	-0.08	1.08
	Signif.	+				*	**	***	***				
Petroșani	Test Z	1.88	0.41	1.22	1.76	2.39	3.50	4.33	4.10	0.07	0.96	-0.31	0.54
	Signif.	+			+	*	***	***	***				
Târgu Jiu	Test Z	1.65	1.04	1.57	1.51	2.09	3.08	3.86	3.52	-0.24	0.94	-0.58	0.28
	Signif.	+				*	**	***	***				
Târgu Logrești	Test Z	1.63	1.02	1.36	1.52	2.02	3.32	3.89	3.44	-0.51	0.82	-0.54	0.41
	Signif.					*	***	***	***				

**Tableau A.2.2. Résultats du test Mann-Kendall pour la tendance des températures maximales mensuelles**

Station Météorologique		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Bechet	Test Z	2.44	1.23	0.95	-0.32	1.69	2.62	2.63	2.72	0.37	0.16	0.80	1.14
	Signif.	*				+	**	**	**				
Craiova	Test Z	2.82	1.36	0.93	-0.31	1.77	2.77	2.59	2.39	-0.51	0.12	0.74	0.74
	Signif.	**				+	**	**	*				
Obîrșia Lotrului	Test Z	2.22	2.54	0.12	-0.03	2.13	3.32	3.02	3.84	0.06	2.01	2.15	2.17
	Signif.	*	*			*	***	**	***		*	*	*
Padeș	Test Z	2.70	1.98	1.07	0.18	3.11	3.67	2.78	3.48	-0.07	0.97	1.57	0.74
	Signif.	**	*			**	***	**	***				
Parâng	Test Z	2.39	2.51	0.01	0.05	1.94	3.27	2.72	3.38	-0.02	1.15	1.19	1.04
	Signif.	*	*			+	**	**	***				
Petroșani	Test Z	2.06	2.39	0.12	0.35	2.11	3.02	2.89	3.68	-0.13	0.68	1.07	0.51
	Signif.	*	*			*	**	**	***				
Târgu Jiu	Test Z	2.98	2.30	0.97	0.31	3.21	3.05	2.45	3.27	-0.28	0.81	1.28	1.14
	Signif.	**	*			**	**	*	**				
Târgu Logrești	Test Z	3.44	2.21	1.14	0.12	2.53	2.78	2.58	2.90	-0.11	0.76	1.24	0.92
	Signif.	***	*			*	**	**	**				

**Tableau A.2.3. Résultats du test Mann-Kendall pour la tendance des températures minimales mensuelles**

Station Météorologique		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Bechet	Test Z	0.22	-0.44	0.87	-0.84	-1.07	-0.18	2.39	0.05	1.12	-0.94	0.08	-1.68
	Signif.							*					+
Craiova	Test Z	0.85	0.06	1.33	-0.05	-0.06	0.46	2.82	1.50	1.59	-0.53	0.35	-0.98
	Signif.							**					

<b>Obîrșia Lotrului</b>	<i>Test Z</i>	1.27	0.47	0.35	1.51	1.00	0.61	3.05	1.99	1.42	-2.29	0.66	-0.48
	<i>Signif.</i>							**	*		*		
<b>Padeș</b>	<i>Test Z</i>	1.20	-0.35	1.04	-0.49	0.41	-0.27	1.66	0.63	1.42	-1.59	-0.36	-1.47
	<i>Signif.</i>							+					
<b>Parâng</b>	<i>Test Z</i>	1.08	-0.01	0.45	1.00	0.62	0.81	3.38	1.48	2.04	-1.64	0.62	-1.32
	<i>Signif.</i>							***		*			
<b>Petroșani</b>	<i>Test Z</i>	1.04	-0.05	0.19	0.74	1.26	1.43	3.43	2.18	2.76	-0.77	0.64	-1.19
	<i>Signif.</i>							***	*	**			
<b>Târgu Jiu</b>	<i>Test Z</i>	1.28	-0.24	1.03	-0.31	0.32	0.38	2.32	1.05	1.58	-1.02	-0.31	-0.80
	<i>Signif.</i>							*					
<b>Târgu Logrești</b>	<i>Test Z</i>	0.50	-0.46	0.93	-0.56	0.34	0.07	2.12	0.93	1.07	-1.38	-0.33	-0.70
	<i>Signif.</i>							*					

## Annexe 3

**Tableau A.3.1.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Bechet selon le critère de Hellmann

Bechet												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	15	16	14	8	9	10	12	16	20	17	12	12
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	7	6	7	5	11	5	7	12	5	9	10	5
Sec -21%-(-30)% Pmoy	2	4	2	5	2	3	7	3	3	1	4	3
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	3	0	6	4	3	5	3	3	2	2	4	4
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	6	5	3	9	8	12	6	3	6	4	5	9
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	3	3	3	3	1	0	2	2	0	2	2	3
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	2	1	2	5	3	5	3	1	1	2	1	4
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	2	8	4	9	5	5	2	2	3	4	2	1
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	13	10	12	5	10	8	11	11	13	12	13	12

**Tableau A.3.2.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Craiova selon le critère de Hellmann

Craiova												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	16	15	14	9	8	9	11	14	19	21	13	10
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	4	6	6	3	6	8	6	7	6	5	5	11
Sec -21%-(-30)% Pmoy	0	3	4	5	7	5	6	8	1	2	4	3
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	4	2	3	4	5	3	6	6	3	1	2	1
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	8	5	7	12	8	6	8	4	4	4	10	8
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	1	1	0	3	3	2	0	2	0	2	2	3
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	2	3	2	3	2	5	4	0	2	2	3	1
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	6	5	3	6	4	4	1	1	5	2	5	5
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	12	13	14	8	9	11	11	11	13	14	9	11

**Tableau A.3.3.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Obîrșia Lotrului selon le critère de Hellmann

Obîrșia Lotrului												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	12	8	9	4	3	5	7	9	12	14	10	7
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	7	10	6	6	9	6	7	11	5	8	5	9
Sec -21%-(-30)% Pmoy	3	1	5	3	8	4	3	5	5	6	4	7
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	5	4	3	6	4	6	6	3	5	3	6	5
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	2	10	10	18	9	11	7	6	5	3	7	5
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	5	1	5	2	5	5	4	1	6	6	2	2
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	5	5	1	2	1	6	10	5	0	0	4	3
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	4	3	7	5	10	5	3	3	3	3	7	6
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	10	11	7	7	4	5	6	10	12	10	7	9

**Tableau A3.4.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Padeș selon le critère de Hellmann

Padeș												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	16	17	12	7	5	9	12	15	16	19	10	13
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	2	5	6	9	10	6	9	6	4	5	15	8

Sec -21%-(-30)% Pmoy	2	2	0	5	2	5	3	3	3	1	2	4
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	3	4	7	4	11	5	5	4	3	2	4	5
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	8	6	7	6	8	8	8	7	5	5	4	6
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	3	1	6	3	4	3	2	1	3	6	1	0
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	2	1	4	3	1	2	0	2	2	2	1	0
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	2	5	2	7	3	4	3	2	3	1	4	4
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	15	12	9	8	8	10	11	13	14	12	11	13

Tableau A.3.5. Fréquence absolue des mois pluvieux à Parâng selon le critère de Hellmann

Parâng												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	12	10	9	5	6	6	8	8	13	18	10	10
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	9	7	5	5	6	4	7	12	5	4	7	7
Sec -21%-(-30)% Pmoy	1	2	6	5	8	4	3	2	5	2	4	7
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	1	7	9	6	3	7	6	8	3	6	4	2
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	7	5	7	11	8	12	7	4	5	6	8	6
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	5	7	2	7	5	4	4	0	6	1	3	3
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	2	1	2	5	3	6	4	3	1	3	1	3
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	7	4	1	3	7	4	8	6	2	3	6	5
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	9	10	12	6	7	6	6	10	13	10	9	10

Tableau A.3.6. Fréquence absolue des mois pluvieux à Petroșani selon le critère de Hellmann

Petroșani												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	12	14	10	6	5	6	9	9	13	18	10	11
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	8	5	9	4	9	6	7	8	4	5	8	5
Sec -21%-(-30)% Pmoy	2	2	4	6	4	6	4	7	6	4	3	5
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	1	3	4	7	8	8	5	7	1	3	6	5
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	5	7	9	9	4	6	7	2	10	5	8	8
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	8	6	2	7	6	7	0	2	2	2	1	1
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	3	2	1	4	3	3	4	2	2	3	3	2
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	4	4	2	4	7	4	11	5	4	4	3	5
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	10	10	12	6	7	7	6	11	11	9	10	11

Tableau A.3.7. Fréquence absolue des mois pluvieux à Târgu Jiu selon le critère de Hellmann

Târgu Jiu												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	15	16	12	5	5	10	11	16	17	19	13	13
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	3	7	3	8	11	5	10	5	3	5	6	11
Sec -21%-(-30)% Pmoy	1	0	5	5	5	5	2	2	1	2	6	1
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	5	3	5	5	4	5	6	4	5	2	3	4
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	5	5	8	6	12	7	9	4	6	6	5	4
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	5	5	3	4	3	3	2	4	3	2	3	3
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	1	4	4	6	2	3	0	1	1	2	1	0
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	4	2	5	7	3	5	1	5	5	2	5	6
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	14	11	8	6	8	9	12	12	12	13	10	11

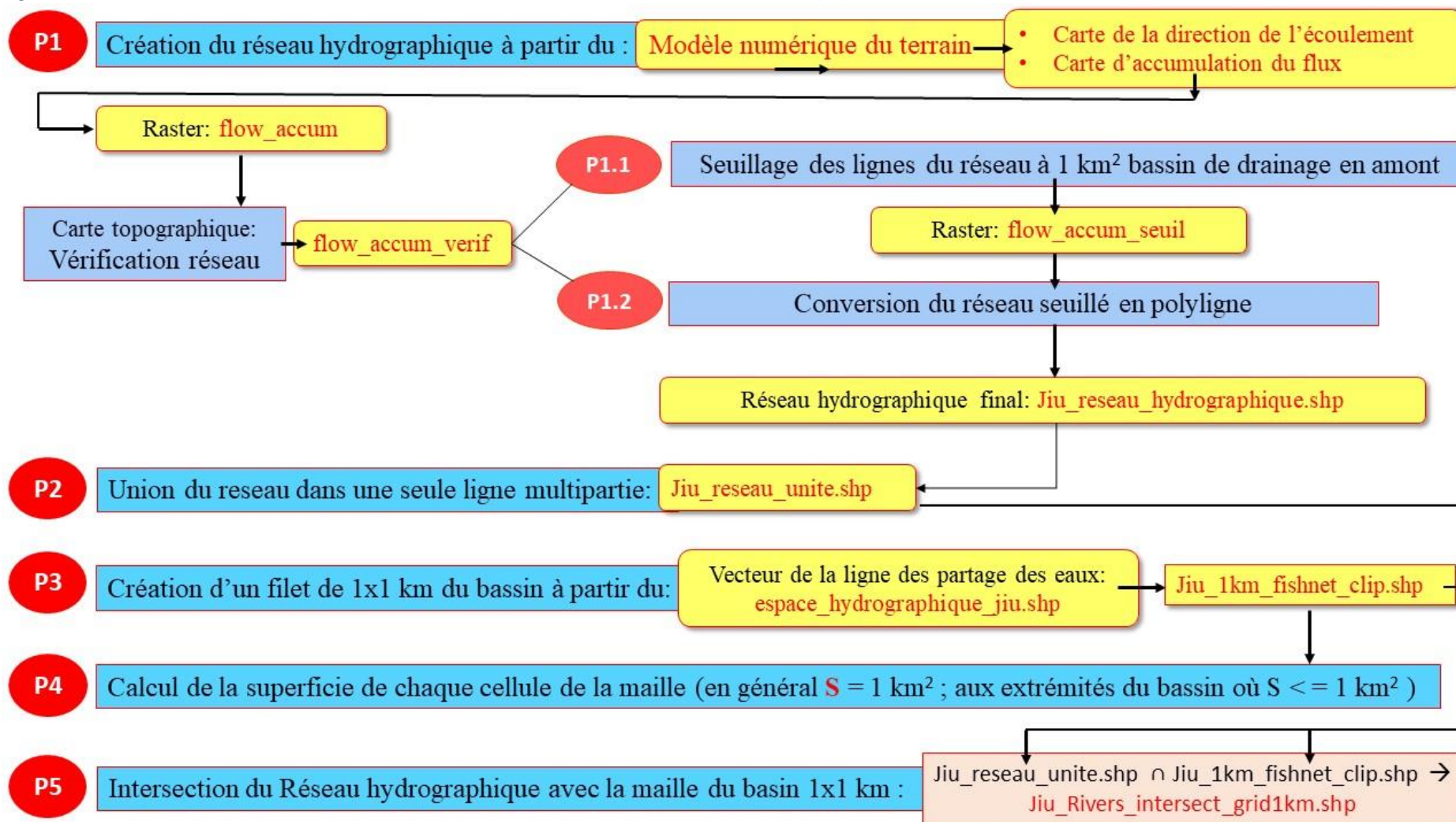
**Tableau A.3.8.** Fréquence absolue des mois pluvieux à Târgu Logrești selon le critère de Hellmann

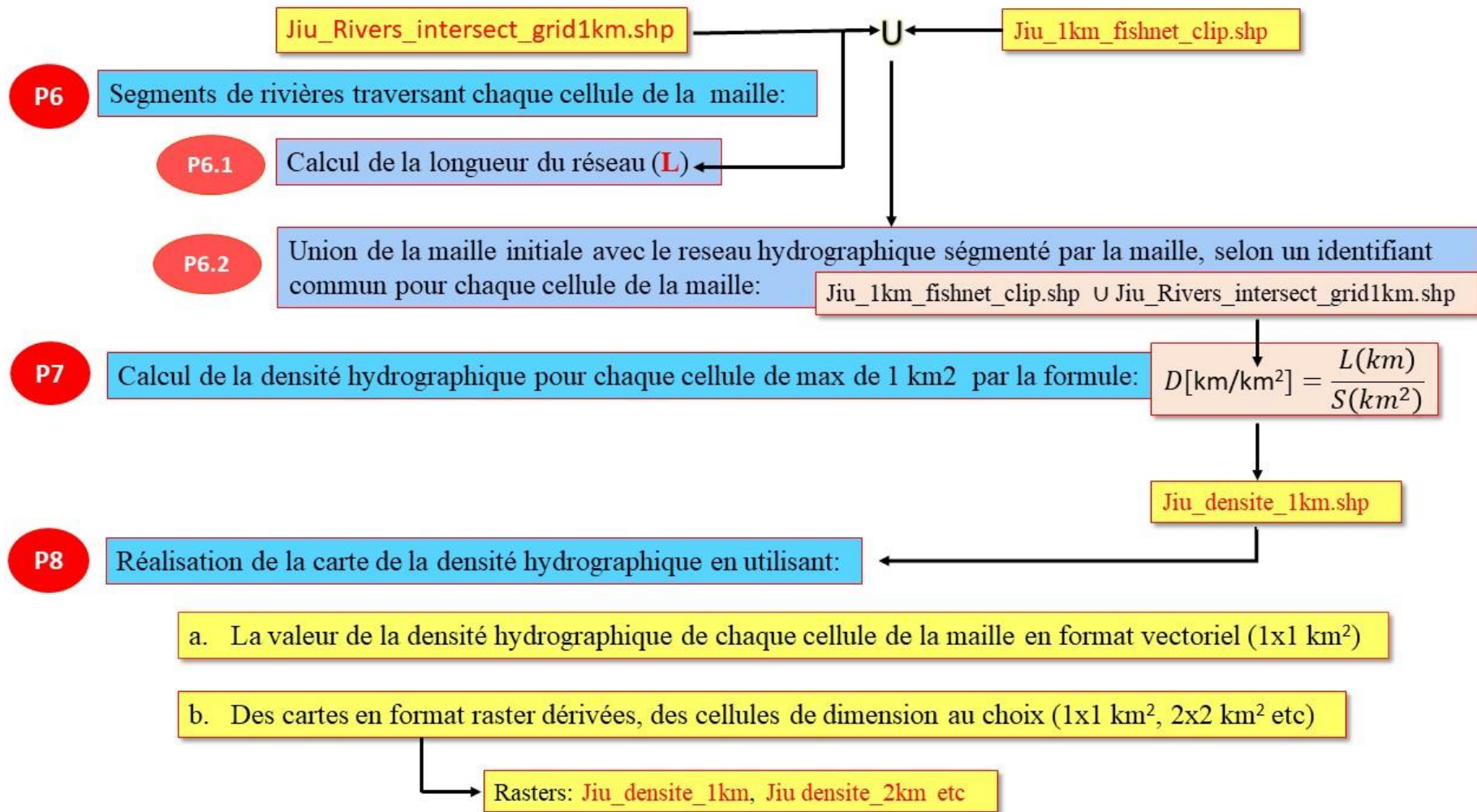
Târgu Logrești												
Qualificatif pluviométrique du mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Extrêmement sec <-50% Pmoy	14	13	10	7	5	10	13	18	17	18	12	15
Très sec -31%-(-50)% Pmoy	5	7	6	3	13	9	8	4	5	5	9	8
Sec -21%-(-30)% Pmoy	2	5	6	4	4	2	3	3	3	4	2	3
Un peu sec -11%-(-20)% Pmoy	2	4	5	7	9	5	5	4	2	2	2	2
Normal (-10)%-(+10)% Pmoy	8	4	8	10	5	5	6	5	6	2	8	2
Un peu pluvieuse 11%-20% Pmoy	3	1	1	5	2	3	5	1	2	2	3	3
Pluvieuse 21%-30% Pmoy	2	4	5	4	2	6	2	3	3	5	3	4
Très pluvieuse 31%-50% Pmoy	6	6	2	8	5	4	1	1	3	2	5	3
Extrêmement pluvieuse >50% Pmoy	11	9	10	4	7	8	10	14	12	13	9	13



## Annexe 4

Figure A.4. Schéma de la réalisation et représentation de la carte de la densité du drainage par la méthode proposée





P9

Méthodes de réduction de l'échelle spatiale (généralisation de l'information de densité hydrographique pour des superficies plus grandes), en prenant la densité moyenne des cellules considérées:

a. La technique des fenêtres de moyenne mobile d'une dimension supérieure à 1 km

b. Aggrégation des cellules → cellules > 1x1 km<sup>2</sup>, 2x2 km<sup>2</sup>

P10

Méthode de représentation choisie: *intervalles définies par l'utilisateur à partir de l'histogramme des valeurs de chaque cellule*

Autres méthodes vérifiées:

- Quantiles
- Natural breaks

P11

Découpage et statistique spatiale sur sous-bassins hydrographiques

## Annexe 5

*Annexe A.5.1. Barrages et réservoirs dans le bassin de la rivière Jiu. Synthèse de différents sources média et documents techniques (pour certaines catégories, il n'a pas été possible de trouver des informations sur les barrages et réservoirs concernés)*

Nom projet d'aménagement	Rivière	Code Cadastrale	Année de début de la construction	Superficie (ha)	Hauteur barrage (m)	Volume (mil. m <sup>3</sup> )		Usages*	Si *H, puissance installée (MW)	Si *écrêtement des crues, le volume d'eau (mil. m <sup>3</sup> )	Profondeur (m)
						Totale	Utile				
Valea de Pești	Valea de Pești	VII – 1.5	1967 - 1973	31	56	5.4	5.3	A, C, H, P	-	0,8	56
Centrale hydroélectrique Dumitra **	Aménagement complexe de la Jiu sur le secteur Livezeni - Bumbesti	Jiu	2004					H	135,6		
Barrage Livezeni		Jiu						H			
Galérie d'adduction Dumitra – Bumbesti		Jiu						H			
Centrale hydroélectrique Bumbesti **		Jiu						H			
Sadu	Sadu	VII-1-20	1936	2,82	15.5	0.15		H	1,6	0,27	
Valea Sadului	Aménagement complexe de la rivière Jiu sur le secteur Valea	Jiu	VII - 1	1989				A, H, S			
Curțisoara		Jiu	VII - 1	1990				E, H, A			
Turcinești		Jiu	VII - 1					H, C			
Vădeni	Jiu	VII-3	1992	107	0,8	0,8		E, H, C?	11,8	-	5.5
Tg-Jiu	Jiu	VII-2	1994		1,3	1.3	0.7	E, H, C?	11,8	-	-

Barrage Cerna (Valea lui Iovan)	Système hydroénergétique complexe Valea Mare (Motru – Cerna – Tismana)	Cerna								-		
Motru		Motru	VII-1-36	1979	29.67	47	6.8	1.43	H, C	36	1,43	17.5
Clocotiș		Bistrița	VII-1.31 6b	1987	30.39	57	2.64	0.53	H, A	4,5		
Vâja		Bistrița	VII-1.31.6b	1986	88.58	92	1,48	1,48	H, C	-	0,63	18.5
Tismana		Tismana	VII-1.31	1985			0,75	0,75 ?	H, P	106		-
Tismana Aval		Tismana	VII-1.31	1985		21.6	1.36	0.62	H, A, P?	3		16
Prize à Rovinari		Jiu	VII-1		1656	5.5	0.55	-	A		-	-
Accumulation népermanente Rovinari	Jiu	VII-1	1965		7,42	150	-	C		150? ****	-	
Accumulation permanente avec barrage Turceni	Jiu			150	12.5	7.4	3.3	C, P, H	10	1,3	4	
Accumulation permanente avec barrage Ișalnița	Jiu	VII-1		180	18	2.5	1.4	C, A		2	3.1	
Accumulation permanente avec barrage Prodila	Prodila				11	-	-			0,5		

\*E – électricité ; C - écrêtement des crues ; A - alimentation en eau ; P – pisciculture ; S - capture sédiments

\*\* Entre les centrales hydroélectriques Dumitra et Bumbesti, il y a la Galerie d'adduction Dumitra – Bumbesti de 12,5 km.

\*\*\* Autres barrages de défense contre les crues mentionnés dans la littérature de spécialité se trouvent dans les sections Lainici, Turceni,

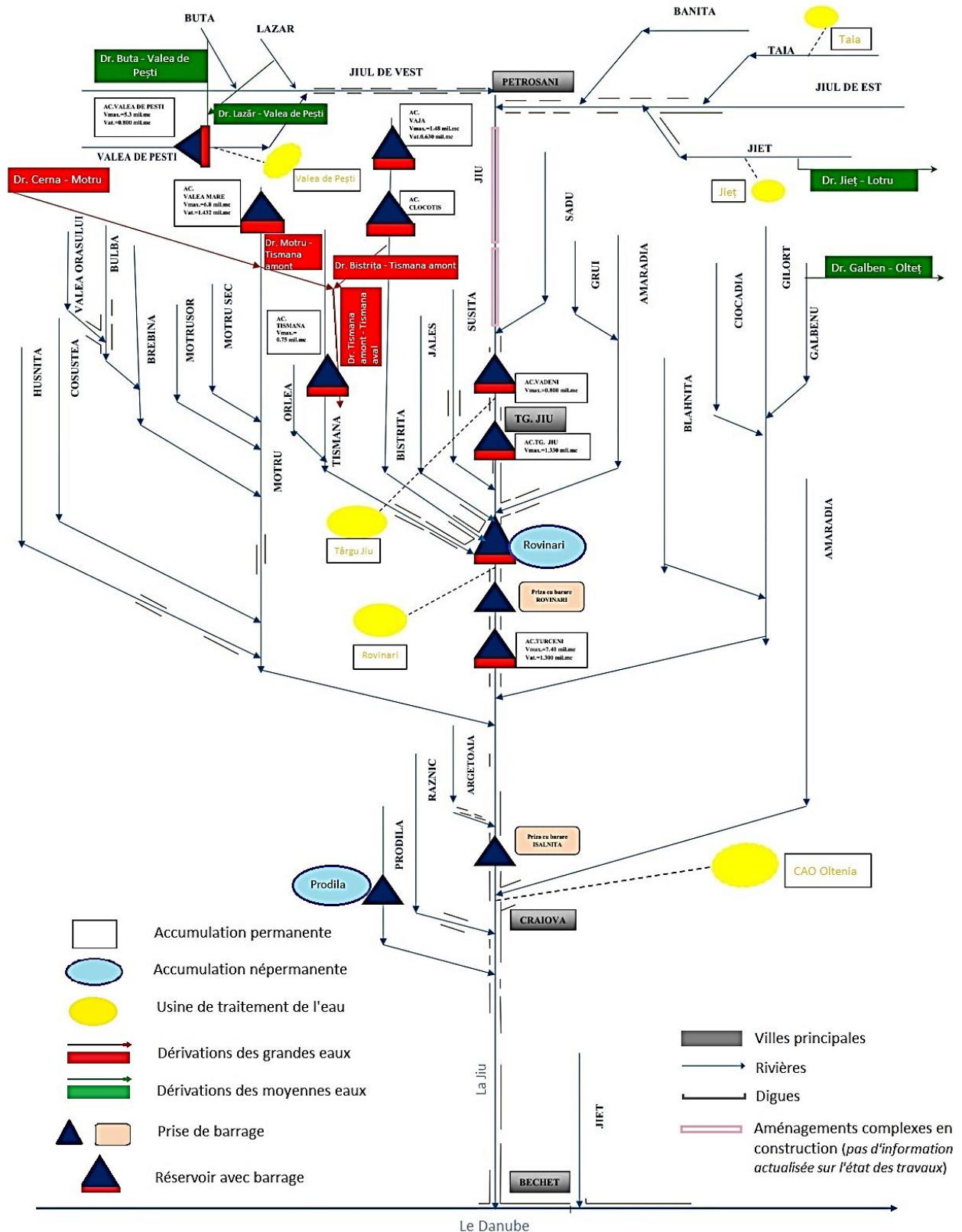
\*\*\*\* Nous avons trouvé le volume de l'accumulation, qui n'est pas forcément égal au volume de l'écrêtement des crues.

\*\*\*\*\* Autres complexes hydroénergétiques sont signalés sur les rivières Gilort et Pârâul Galben, mais sans informations sur le type d'aménagement et la puissance installée.



# Annexe 6

Annexe A.6.1. Le schéma synoptique des aménagements fonctionnels dans le bassin de la rivière Jiu (adapté selon ABA Jiu sans les informations sur les aménagements complexes en construction entre Livezeni et Bumbesti et entre Valea Sadului et Vădeni)



## Annexe 7

Tableau A.7.1 Les stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu et leur état de fonctionnement

No. Crt	Station hydrométrique	Rivière	Nom secondaire (de la rivière/ du tronçon)	L'année de mise en fonctionnement	L'année du premier jaugeage	Année de suppression	Période d'intrruption	Superficie du bassin drainé (km <sup>2</sup> )	Altitude moyenne (m)	Q <sub>0</sub> . (m <sup>3</sup> ·s <sup>-3</sup> ) Durant toute la période de fonctionnement
1	ALBEȘTI	Amaradia		1949	1953		1952;1957;1958;1961	859	273	2.15
2	Am. Confl. ROSTOVANU	Jiu			2010			75.5	1421.3	0.42
3	ARGETOAIA	Argetoaia	Salcia	1982	1982			186	243	0.26
4	Av. VALEA PIETRII	Motru Sec		1974	1988			50	820	0.92
5	BAIA DE ARAMĂ	Bulba		1992	1993			14.1	400.9	1.22
6	BAIA DE FIER	Pârâul Galben	Baia	1982	1982			58	1230	1.01
7	BALANESTI	Gruiu			1988			19	374	0.11
8	BALTENI	Jiu			1991	1997		3065.4	752.6	43.1
9	BĂRBĂȚENI	Jiu		1949	1960		1954-1956	289	1263	6.4
10	BORZII VINETI	Jiu			1966	1981		1111.	1171.6	23.9
11	BRATILOV	Brebina	Obârșia		1988	1992		40.08	629.8	0.58
12	BREASTA	Raznic		1948	1955		1957-1958	475	201	0.93
13	BREBINA	Brebina		1974	1988			49	700	1.07
14	BROȘTENI	Motru		1952	1955			646	526	8.4
15	BROȘTENI_JIU	Jiu			1974	1977		3786.7	653.7	61.9
16	BUSTUCHIN	Amaradia		1976	1994			31.8	398.9	0.09
17	BUTA	Buta			2010			17.9	1559.6	0.13
18	CÂLNIC	Tismana		1968	1968	1998		387.9	356.8	9.2
19	CÂMPU LUI NEAG	Jiu		1951	1957		1956-1957	159	1346	3.21
20	CELEI	Orlea		1953	1953			62	538	1.83
21	CIOCADIA	Ciocadia		1982	1982			45	848	0.65
22	CLOSANI	Motru		1965	1966			109	1019	2.02
23	COLIBAȘI	Blahnita		1952	1952	1966	1952-1955 & 1961	130.4	583.4	1.61
24	CORCOVA	Coșuștea		1952	1955		1952-1954	420	482	3.01

25	DĂRĂNEȘTI	Bănița		1974	1973			91	1007	1.38
26	FAȚA MOTRULUI	Motru		1921	1951			1700	384	12.8
27	FILIAȘI	Jiu		1922	1951		1953	5239	563	63.6
28	GODINEȘTI	Tismana		1946	1954		1951-1953	126	501	10.1
29	HUREZANI	Amaradia		1973	1973	1990		227.3	348.8	0.87
30	IASI-GORJ	Amaradia Pietroasă			1988	1998		137.3	341.5	0.65
31	IGIROASA	Hușnița		1983	1983	1992		153.7	295.7	0.13
32	ISCRONI	Jiu		1952	1958		1955-1956	502	1134	10.3
33	JIEȚ	Jieț		1950	1960		1965-1966	73	1520	1.47
34	LAZĂRU	Lazăru			1950			21.7	1637.8	0.77
35	LIVEZENI	Jiu De Est		1949	1958			460	1256	7.7
36	LOGREȘTI	Amaradia		1980	1980	1986		80.4	375.8	0.50
37	LONEA	Jiu De Est		1972	1972			135	1206	2.4
38	LONEA_TAIA	Taia		1964	1965			826	1476	14.4
39	MOTRU SEC	Motru Sec		1974	1988			66	725	0.66
40	MOTRUȘOR	Motrușor			1988			12.5	584.5	0.25
41	MUȘETEȘTI	Amaradia			1988	1998		7.01	722.4	0.06
42	MUȘETEȘTI STANCESTI	Stancesti			1988	1998		6.5	611.5	0.04
43	NEGOIEȘTI	Amaradia		1971	1974		1972-1973	720	290	0.97
44	NOVACI	Gilort		1949	1951	1986	1957	120.4	1383.1	4.1
45	OHABA	Amaradia			1988			30.6	501.9	0.22
46	PEȘTEANA	Jiu			1952	1978	1957-1962	3267.2	721.4	52.7
47	PESTERA BOLII	Jupâneasa		1982	1982			48	1067	0.60
48	PETROȘANI	Maleia			1987			12	1030	0.22
49	PLOȘORU	Jiu		1978	1978	1989		3364	706.1	46.3
50	PODARI	Jiu		1914	1950			9253	446	84.6
51	POJARU	Poienita		1976	1994			20.8	378.1	0.04
52	POLATIȘTEA	Polatiștea		1966	1964		1965	50	1403	1.65
53	RĂCARI	Jiu		1976	1976			7217	508	76.0
54	ROSTOVANU	Rostovanu			2010			7.78	1354.8	0.24
55	ROVINARI	Jiu		1982	1982			2875	697	44

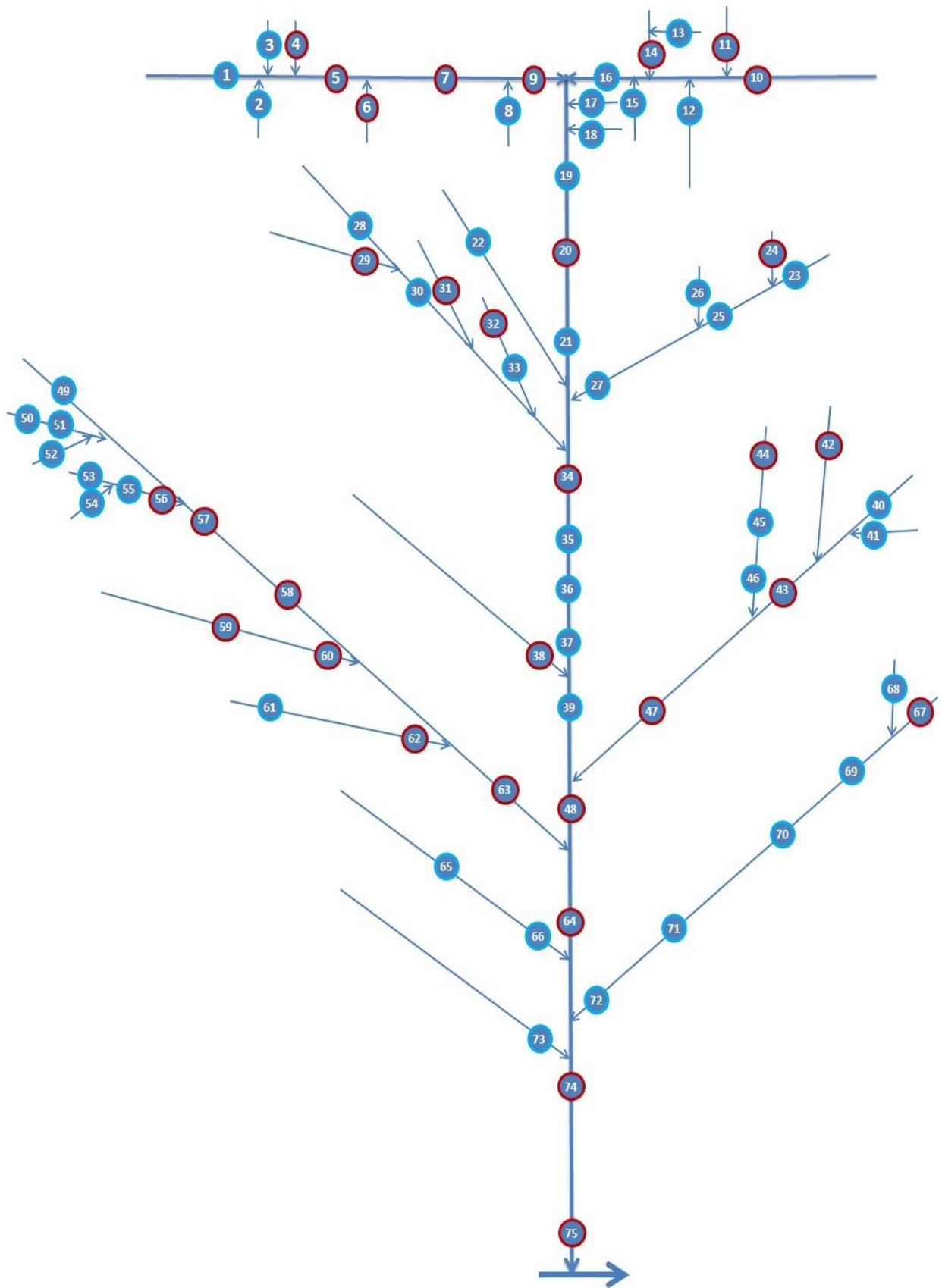
56	RUNCU	Jaleș	Sohodol	1951	1951		1954-1956 & 1957	118	976	2.3
57	SACELU	Blahnița		1982	1982			48	725	0.65
58	SADU	Jiu		1982	1982			1255	1066	20.3
59	SCAESTI	Argetoaia		2003	16/05/2003			249.6	227.7	0.35
60	SISESTI	Coșuștea		1990	1990			257.8	524.7	1.6
61	STOLOJANI	Jaleș		1952	1952			154	851	3.1
62	STRÂMBUTA	Izvor		1966	1966			38	1183	0.81
63	STREHAIA	Hușnița		1969	1970			312	257	0.83
64	TÂRMIGANI	Motru		1958	1959			302	751	6.4
65	TARNITA	Brebina		1970	1970			77	525	2.5
66	TELEȘTI	Bistrița		1955	1957		1970	270	540	4.2
67	TG. CĂRBUNEȘTI	Gilort		1966	1951		1956-1966	630	749	7.9
68	TG. CĂRBUNEȘTI	Blahnița		1966	1967			225	467	1.5
69	TURBUREA	Gilort		1921	1951			1027	590	10.2
70	TURCENI	Jilț		1951	1964			376	540	1.10
71	VĂDENI	Jiu		1953	1953	1986		1506.1	1069.1	26.4
72	VAIDEI	Șușița		1959	1960			79	1055	2.17
73	VALEA DE PEȘTI	Valea de Pești		1987	1987			25	1300	0.90
74	VULCAN	Merișoara		1965	1965			10	1112	0.33
75	ZĂVAL	Jiu		1921	1963		1963	10046	417	86.8

Raisons de l'interruption de l'activité hydrométrique aux stations :

- ? Niveaux manquants
- ? Annuaire manquant
- ? Mise en fonctionnement
- ? Les moyennes mensuelles seulement
- ? Cause inconnue

Tableau A.7.2 Schéma topologique des stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (en fonction ou nonfonctionnelles)

(Légende - continuation page suivante)





**Annexe A.7.2.** Schéma topologique des stations hydrométriques du bassin de la rivière Jiu (en fonction ou nonfonctionnelles)

(Légende → continuation page suivante)

**Légende**



Avec jaugeage de l'eau et de la concentration des alluvions en suspension\*



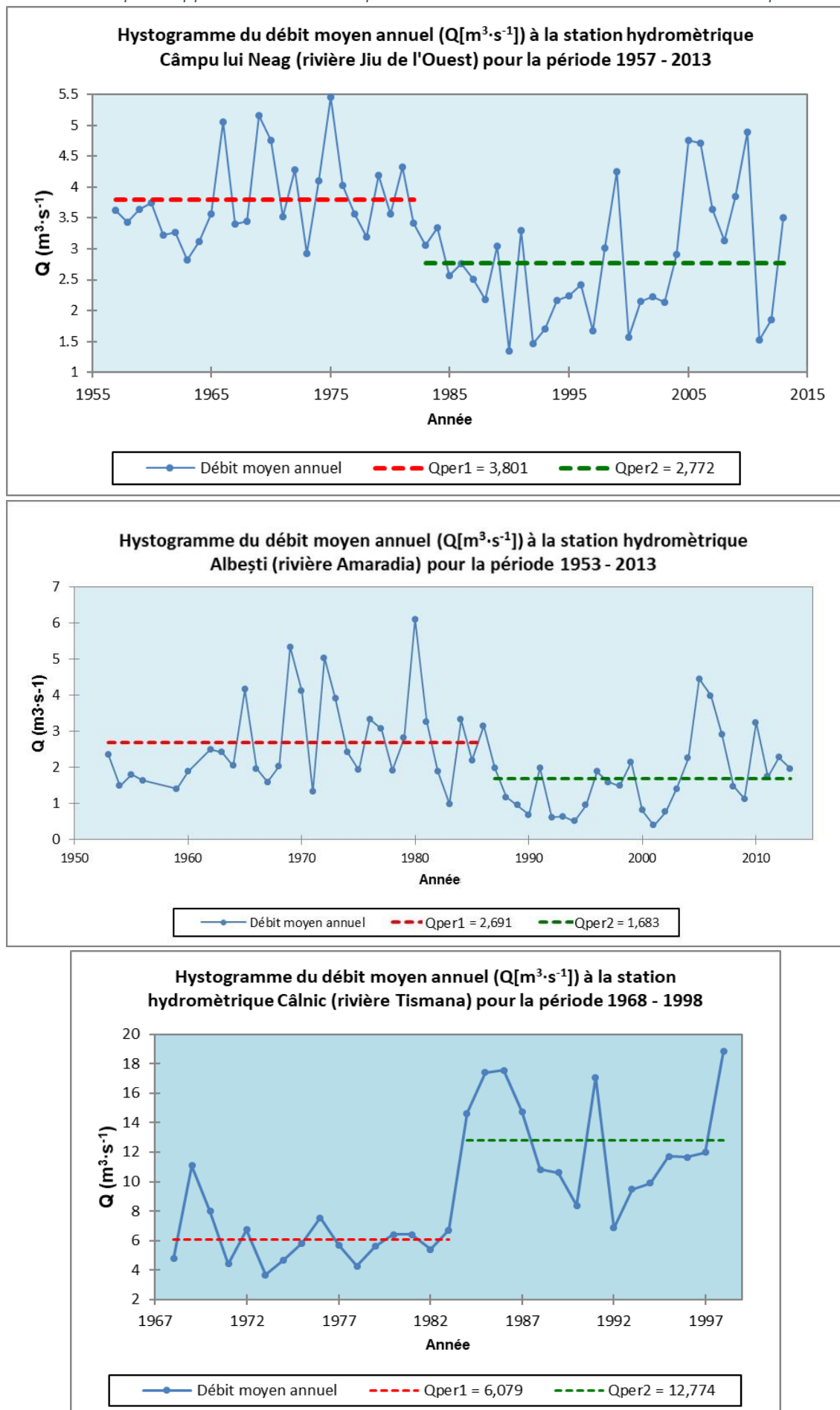
Seulement avec jaugeage de l'écoulement l'eau

Indice	Station hydrométrique	Rivière
1	Am. Confl. ROSTOVANU	Jiu
2	ROSTOVANU	Rostovanu
3	BUTA	Buta
4	LAZĂR	Lazăru
5	CÂMPU LUI NEAG	Jiu
6	VALEA DE PEȘTI	Valea de Pești
7	BĂRBĂȚENI	Jiu
8	VULCAN	Merișoara
9	ISCRONI	Jiu
10	LONEA	Jiu De Est
11	LONEA_TAIA	Taia
12	JIEȚ	Jieț
13	PESTERA BOLII	Jupâneasa
14	DĂRĂNEȘTI	Bănița
15	PETROȘANI	Maleia
16	LIVEZENI	Jiu De Est
17	STRÂMBUTA	Izvor
18	POLATIȘTEA(P.ALB)	Polatiștea
19	BORZII VINETI	Jiu
20	SADU	Jiu
21	VĂDENI	Jiu
22	VAIDEI	Șușița
23	MUȘETEȘTI	Amaradia
24	MUȘETEȘTI_STANCESTI	Stancesti
25	OHABA	Amaradia
26	BALANESTI	Gruiu
27	IASI-GORJ	Amaradia Pietroasă
28	GODINEȘTI	Tismana
29	CELEI	Orlea
30	CÂLNIC	Tismana
31	TELEȘTI	Bistrița
32	RUNCU	Jaleș
33	STOLOJANI	Jaleș
34	ROVINARI	Jiu
35	BALTENI	Jiu
36	PEȘTEANA	Jiu
37	PLOPȘORU	Plopșoru
38	TURCENI	Jilț
39	BROȘTENI_JIU	Jiu
40	NOVACI	Gilort

41	BAIA DE FIER	Pârâul Galben
42	CIOCADIA	Ciocadia
43	TG. CĂRBUNEȘTI	Gilort
44	SACELU	Blahnița
45	COLIBAȘI	Blahnița
46	TG. CĂRBUNEȘTI	Blahnița
47	TURBUREA	Gilort
48	FILIAȘI	Jiu
49	CLOSANI	Motru
50	Aval VALEA PIETRII	Motru Sec
51	MOTRU SEC	Motru Sec
52	MOTRUȘOR	Motrușor
53	BRATILOV	Brebina
54	BAIA DE ARAMĂ	Bulba
55	BREBINA	Brebina
56	TARNITA	Brebina
57	TÂRMIGANI	Motru
58	BROȘTENI	Motru
59	SISESTI	Coșuștea
60	CORCOVA	Coșuștea
61	IGIROASA	Hușnița
62	STREHAIA	Hușnița
63	FAȚA MOTRULUI	Motru
64	RĂCARI	Jiu
65	ARGETOAIA	Argetoaia
66	SCAESTI	Argetoaia
67	BUSTUCHIN	Amaradia
68	POJARU	Poienita
69	LOGREȘTI	Amaradia
70	HUREZANI	Amaradia
71	NEGOIEȘTI	Amaradia
72	ALBEȘTI	Amaradia
73	BREASTA	Raznic
74	PODARI	Jiu
75	ZĂVAL	Jiu

## Annexe 8

Figure A.8.1. Exemples supplémentaires des ruptures de données dans les séries des débits liquides



## Annexe 9

*Annexe A.9.1. Les caractéristiques des crues horaires aux stations hydrométriques de la rivière Jiu*

s.h.	Rivière	No. crue	Q <sub>max</sub>	Heure Q <sub>max</sub>	Wc	Wd	Wt	h	Tc	Td	Tt	Coefficient de crue (γ)	Heure Q <sub>bi</sub>	Heure Q <sub>bf</sub>
Iscroni	Jiu de l'Ouest	1	625	10/21/1964 10:00	29.7	36.0	65.7	130.8	51	127	178	0.16	10/19/1964 7:00	10/26/1964 17:00
		2	392	6/5/1965 0:00	3.6	63.6	67.2	133.9	16	190	206	0.23	6/4/1965 8:00	6/12/1965 22:00
		3	316	7/29/1966 7:00	5.2	22.8	28.0	55.7	17	108	125	0.20	7/28/1966 14:00	8/2/1966 19:00
		4	321	6/11/1970 4:00	6.4	21.0	27.4	54.6	35	75	110	0.22	6/9/1970 17:00	6/14/1970 7:00
		5	392	7/14/1972 1:00	6.8	17.7	24.5	48.8	18	64	82	0.21	7/13/1972 7:00	7/16/1972 17:00
		6	296	5/10/1973 17:00	4.3	37.4	41.8	83.2	10	168	178	0.22	5/10/1973 7:00	5/17/1973 17:00
		7	275	10/16/1974 9:00	17.1	22.6	39.7	79.0	64	104	168	0.24	10/13/1974 17:00	10/20/1974 17:00
		8	282	10/21/1974	44.6	46.1	90.7	180.7	196	236	432	0.21	10/13/1974 17:00	10/31/1974 17:00
		9	282	10/21/1974 21:00	4.3	46.1	50.4	100.5	14	236	250	0.20	10/21/1974 7:00	10/31/1974 17:00
		10	217	7/27/2004 19:00	6.5	23.8	30.3	60.4	25	119	144	0.27	7/26/2004 18:00	8/1/2004 18:00
		11	226	7/10/2005 2:00	4.1	41.0	45.1	89.8	32	232	264	0.21	7/8/2005 18:00	7/19/2005 18:00
Sadu	Jiu	1	229	5/11/1984 0:00	11.5	100.8	112.2	89.4	36	222	258	0.53	5/9/1984 12:00	5/20/1984 6:00
		2	251	4/1/1987 2:00	15.9	32.1	48.1	38.3	57	80	137	0.39	3/29/1987 17:00	4/4/1987 10:00
		3	220	6/7/1989 6:00	17.9	41.3	59.2	47.2	72	132	204	0.37	6/4/1989 6:00	6/12/1989 18:00
		4	235	6/9/1991 6:00	17.9	61.8	79.6	63.5	48	156	204	0.46	6/7/1991 6:00	6/15/1991 18:00
		5	270	7/3/1991 3:00	17.1	45.1	62.2	49.6	39	105	144	0.44	7/1/1991 12:00	7/7/1991 12:00
		6	394	8/13/1999 17:00	3.9	19.3	23.2	18.5	23	73	96	0.17	8/12/1999 18:00	8/16/1999 18:00
		7	236	7/27/2004 21:00	5.7	42.3	48.0	38.2	27	163	190	0.30	7/26/2004 18:00	8/3/2004 16:00
		8	276	11/9/2004 11:00	9.0	30.0	39.0	31.1	42	97	139	0.28	11/7/2004 17:00	11/13/2004 12:00
		9	259	11/15/2004 3:00	9.0	48.7	57.7	46.0	20	182	202	0.31	11/14/2004 7:00	11/22/2004 17:00
		10	370	10/23/2007 16:00	17.3	35.6	52.9	42.2	70	121	191	0.21	10/20/2007 18:00	10/28/2007 17:00
		11	213	6/1/2010 11:00	8.1	48.0	56.0	44.7	41	191	232	0.31	5/30/2010 18:00	6/9/2010 10:00
R d J i		1	467	5/13/1984 0:00	90.9	169.5	260.3	90.6	84	198	282	0.55	5/9/1984 12:00	5/21/1984 6:00

		2	524	4/1/1987 10:00	34.4	118.4	152.8	53.1	41	106	147	0.55	3/30/1987 17:00	4/5/1987 20:00
		3	498	5/22/1987 15:00	40.3	73.7	114.0	39.7	45	89	134	0.47	5/20/1987 18:00	5/26/1987 8:00
		4	549	6/9/1991 14:00	51.3	141.8	193.1	67.2	56	148	204	0.48	6/7/1991 6:00	6/15/1991 18:00
		5	438	7/3/1991 0:00	30.4	85.0	115.4	40.1	39	114	153	0.48	7/1/1991 9:00	7/7/1991 18:00
		6	438	9/5/1999 0:00	46.6	63.3	109.9	38.2	54	108	162	0.43	9/2/1999 18:00	9/9/1999 12:00
		7	469	11/15/2004 17:00	138.8	93.4	232.2	80.8	178	120	298	0.46	11/8/2004 7:00	11/20/2004 17:00
		8	408	3/24/2007 7:00	32.6	70.2	102.8	35.7	72	95	167	0.42	3/21/2007 7:00	3/28/2007 6:00
		9	458	10/24/2007 6:00	40.7	136.1	176.9	61.5	48	289	337	0.32	10/22/2007 6:00	11/5/2007 7:00
Filiași	Jiu	1	1600	10/11/1972 11:00	602.3	334.5	936.8	178.8	196	356	552	0.29	10/3/1972 7:00	10/26/1972 7:00
		2	1160	5/11/1973 9:00	53.8	243.4	297.2	56.7	26	238	264	0.27	5/10/1973 7:00	5/21/1973 7:00
		3	1020	11/22/1976 2:00	198.1	192.2	390.3	74.5	177	245	422	0.25	11/14/1976 17:00	12/2/1976 7:00
		4	889	7/3/1991 0:00	63.5	211.9	275.4	52.6	36	210	246	0.35	7/1/1991 12:00	7/11/1991 18:00
		5	860	3/14/2006 3:00	41.1	60.9	102.0	19.5	26	48	74	0.45	3/13/2006 1:00	3/16/2006 3:00
		6	840	11/19/2007 17:00	60.6	58.6	119.2	22.8	38	26	64	0.62	11/18/2007 3:00	11/20/2007 19:00
Răcari	Jiu	1	1040	11/22/1976 4:00	133.8	185.8	319.6	44.3	59	109	168	0.51	11/19/1976 17:00	11/26/1976 17:00
		2	1020	5/13/1984 9:00	176.3	314.6	490.8	68.0	93	213	306	0.44	5/9/1984 12:00	5/22/1984 6:00
		3	958	7/3/1991 4:00	66.2	238.8	305.0	42.3	50	192	242	0.37	7/1/1991 2:00	7/11/1991 4:00
		4	1030	7/13/1999 19:00	62.8	199.3	262.1	36.3	49	203	252	0.28	7/11/1999 18:00	7/22/1999 6:00
		5	885	7/14/2005 18:00	168.7	79.8	248.5	34.4	72	48	120	0.65	7/11/2005 18:00	7/16/2005 18:00
		6	1012	3/14/2006 9:00	86.5	102.5	189.0	26.2	34	44	78	0.67	3/12/2006 23:00	3/16/2006 5:00
		7	1000	4/13/2006 13:00	51.9	109.4	161.4	22.4	20	52	72	0.62	4/12/2006 17:00	4/15/2006 17:00
		8	989	10/24/2007 1:00	40.7	160.2	200.9	27.8	18	68	86	0.66	10/23/2007 7:00	10/26/2007 21:00
		9	1036	11/19/2007 23:00	102.7	135.7	238.4	33.0	46	60	106	0.60	11/18/2007 1:00	11/22/2007 11:00
		10	996	1/29/2009 11:00	61.8	197.3	259.1	35.9	42	247	289	0.25	1/27/2009 17:00	2/8/2009 18:00
Podari	Jiu	1	2000	10/11/1972 10:00	773.8	593.4	1367.2	147.8	195	453	648	0.29	10/3/1972 7:00	10/30/1972 7:00
		2	1100	5/11/1973 22:00	79.8	416.9	496.8	53.7	39	441	480	0.26	5/10/1973 7:00	5/30/1973 7:00
		3	1170	7/3/1991 6:00	80.0	185.2	265.1	28.7	34	74	108	0.58	7/1/1991 20:00	7/6/1991 8:00
		4	1015	11/20/2007 11:00	138.5	158.4	296.9	32.1	98	114	212	0.38	11/16/2007 9:00	11/25/2007 5:00
		5	1950	1/9/1953 11:00	352.7	274.9	627.7	67.8	147	150	297	0.30	1/3/1953 8:00	1/15/1953 17:00
		6	1271	6/3/1953 8:00	143.9	308.1	452.0	192.1	48	177	225	0.44	6/1/1953 8:00	6/10/1953 17:00



		7	1316	6/9/1961 17:00	181.6	343.7	525.3	56.8	82	288	370	0.30	6/6/1961 7:00	6/21/1961 17:00
Zăval	Jiu	1	1016	3/18/1969 7:00	239.2	253.8	493.0	49.1	158	192	350	0.39	3/11/1969 17:00	3/26/1969 7:00
		2	1690	10/11/1972 22:00	705.9	523.1	1229.0	122.3	183	273	456	0.44	10/4/1972 7:00	10/23/1972 7:00
		3	1150	11/22/1976 21:00	296.6	356.8	653.4	65.0	182	274	456	0.35	11/15/1976 7:00	12/4/1976 7:00
		4	1220	7/4/1991 6:00	142.6	345.9	488.5	48.6	72	228	300	0.37	7/1/1991 6:00	7/13/1991 18:00
		5	1026	4/15/2006 1:00	114.8	69.5	184.3	18.3	43	35	78	0.64	4/13/2006 6:00	4/16/2006 12:00
		6	939	11/21/2007 9:00	136.5	199.2	335.6	33.4	97	165	262	0.38	11/17/2007 8:00	11/28/2007 6:00
		7	1012	1/31/2009 3:00	88.7	233.1	321.8	32.0	81	197	278	0.32	1/27/2009 18:00	2/8/2009 8:00

Annexe A.9.2. Les caractéristiques des crues horaires aux stations hydrométriques des affluents de la rivière Jiu

s.h.	Rivière	No. crue	Q <sub>max</sub>	Heure Q <sub>max</sub>	Wc	Wd	Wt	h	Tc	Td	Tt	Coefficient de crue ( $\gamma$ )	Heure Q <sub>bi</sub>	Heure Q <sub>bf</sub>
Târnigani	Motru	1	210	12/14/1960 7:00	26.3	24.4	50.7	168.0	96	202	298	0.23	12/10/1960 7:00	12/22/1960 17:00
		2	274	4/30/1961 14:00	3.6	29.7	33.3	110.2	21	209	230	0.15	4/29/1961 17:00	5/9/1961 7:00
		3	362	6/8/1961 5:00	19.4	36.7	56.0	185.6	46	204	250	0.17	6/6/1961 7:00	6/16/1961 17:00
		4	694	7/30/1969 7:00	17.6	40.0	57.6	190.7	14	144	158	0.15	7/29/1969 17:00	8/5/1969 7:00
		5	282	12/10/1969 16:00	36.2	29.6	65.8	217.9	105	121	226	0.29	12/6/1969 7:00	12/15/1969 17:00
		6	212	5/24/1980 16:00	8.5	24.9	33.5	110.8	33	63	96	0.46	5/23/1980 7:00	5/27/1980 7:00
		7	308	7/12/1999 16:00	4.4	27.7	32.1	106.4	10	122	132	0.22	7/12/1999 6:00	7/17/1999 18:00
		8	245	9/4/1999 15:00	19.6	21.0	40.6	134.6	45	111	156	0.30	9/2/1999 18:00	9/9/1999 6:00
		9	205	11/15/2004 1:00	6.1	16.4	22.6	74.8	32	107	139	0.22	11/13/2004 17:00	11/19/2004 12:00
		10	257	11/9/2009 7:00	9.8	29.7	39.5	130.9	38	130	168	0.25	11/7/2009 17:00	11/14/2009 17:00
Telești	Bistrița	1	141	7/30/1969 15:00	3.5	13.1	16.6	61.5	22	98	120	0.27	7/29/1969 17:00	8/3/1969 17:00
		2	181	10/9/1972 7:00	32.5	34.4	66.9	247.8	120	240	360	0.29	10/4/1972 7:00	10/19/1972 7:00
		3	131	11/21/1976 5:00	4.3	12.5	16.8	62.4	36	74	110	0.32	11/19/1976 17:00	11/24/1976 7:00
		4	375	6/9/1991 0:00	6.5	71.0	77.5	287.1	42	894	936	0.06	6/7/1991 6:00	7/16/1991 6:00
		5	348	7/18/1991 12:00	3.8	5.5	9.4	34.7	10	48	58	0.13	7/18/1991 2:00	7/20/1991 12:00
		6	164	7/12/1999 21:00	3.7	14.4	18.1	66.9	15	115	130	0.24	7/12/1999 6:00	7/17/1999 16:00
		7	151	9/4/1999 16:00	11.4	17.8	29.1	107.9	36	124	160	0.33	9/3/1999 4:00	9/9/1999 20:00
		8	165	11/9/2004 10:00	4.4	44.7	49.1	181.8	27	261	288	0.29	11/8/2004 7:00	11/20/2004 7:00

		9	154	10/23/2007 11:00	3.7	10.8	14.5	53.6	17	67	84	0.31	10/22/2007 18:00	10/26/2007 6:00
		10	153	1/14/1958 7:00	7.4	21.0	28.4	105.3	38	168	206	0.25	1/12/1958 17:00	1/21/1958 7:00
<b>Turburea</b>	<b>Gilort</b>	1	406	5/29/1957 9:00	88.4	38.2	126.7	123.3	266	142	408	0.21	5/18/1957 7:00	6/4/1957 7:00
		2	438	6/7/1961 7:00	10.8	48.2	58.9	57.4	14	144	158	0.24	6/6/1961 17:00	6/13/1961 7:00
		3	480	10/11/1972 7:00	142.4	47.2	189.7	184.7	192	250	442	0.25	10/3/1972 7:00	10/21/1972 17:00
		4	730	5/11/1973 1:00	18.4	44.3	62.7	61.1	18	126	144	0.17	5/10/1973 7:00	5/16/1973 7:00
		5	348	5/22/1987 11:00	9.5	22.4	31.9	31.0	17	91	108	0.24	5/21/1987 18:00	5/26/1987 6:00
		6	364	6/7/1989 15:00	7.5	18.1	25.6	24.9	21	75	96	0.20	6/6/1989 18:00	6/10/1989 18:00
		7	311	7/12/2005 10:00	9.0	52.2	61.2	59.6	52	152	204	0.27	7/10/2005 6:00	7/18/2005 18:00
		8	339	4/13/2006 6:00	16.2	23.7	39.9	38.8	48	120	168	0.19	4/11/2006 6:00	4/18/2006 6:00
		9	436	10/23/2007 14:00	13.8	41.3	55.2	53.7	32	137	169	0.21	10/22/2007 6:00	10/29/2007 7:00
		10	314	5/26/2012 19:00	11.9	36.7	48.6	47.3	49	143	192	0.22	5/24/2012 18:00	6/1/2012 18:00
<b>Turceni</b>	<b>Jilț</b>	1	88	10/11/1972 7:00	27.6	4.3	32.0	85.1	182	48	230	0.44	10/3/1972 17:00	10/13/1972 7:00
		2	97	5/11/1973 1:00	1.8	4.7	6.5	17.3	18	54	72	0.26	5/10/1973 7:00	5/13/1973 7:00
		3	88	12/15/1974 21:00	1.9	6.7	8.6	22.9	28	63	91	0.30	12/14/1974 17:00	12/18/1974 12:00
		4	102	11/21/1976 7:00	9.3	7.0	16.4	43.6	158	106	264	0.17	11/14/1976 17:00	11/25/1976 17:00
		5	102	2/10/1984 16:00	2.1	4.1	6.2	16.5	23	63	86	0.20	2/9/1984 17:00	2/13/1984 7:00
		6	121	4/2/1987 15:00	5.1	5.6	10.7	28.4	33	63	96	0.26	4/1/1987 6:00	4/5/1987 6:00
		7	117	5/22/1987 9:00	2.9	3.3	6.2	16.5	21	45	66	0.22	5/21/1987 12:00	5/24/1987 6:00
		8	85	4/14/2003 7:00	1.7	3.0	4.7	12.5	19	35	54	0.28	4/13/2003 12:00	4/15/2003 18:00
		9	100	8/16/2005 19:00	3.3	7.6	10.9	29.0	13	71	84	0.36	8/16/2005 6:00	8/19/2005 18:00
		10	92	3/13/2006 18:00	5.5	7.1	12.7	33.7	59	69	128	0.30	3/11/2006 7:00	3/16/2006 15:00
<b>Breasta</b>	<b>Raznic</b>	1	152	4/2/1963 7:00	21.0	7.2	28.2	59.4	230	82	312	0.17	3/23/1963 17:00	4/5/1963 17:00
		2	162	7/8/1970 15:00	7.1	9.9	16.9	35.7	22	88	110	0.26	7/7/1970 17:00	7/12/1970 7:00
		3	190	10/8/1972 2:00	15.9	28.9	44.8	94.3	81	183	264	0.25	10/4/1972 17:00	10/15/1972 17:00
		4	118	5/11/1973 5:00	2.6	4.1	6.7	14.2	12	74	86	0.18	5/10/1973 17:00	5/14/1973 7:00
		5	132	11/21/1976 7:00	9.4	11.0	20.4	43.0	38	104	142	0.30	11/19/1976 17:00	11/25/1976 15:00
		6	115	2/12/1977 7:00	7.4	11.9	19.3	40.7	72	192	264	0.18	2/9/1977 7:00	2/20/1977 7:00
		7	128	7/2/1991 15:00	4.8	8.9	13.7	28.9	21	69	90	0.33	7/1/1991 18:00	7/5/1991 12:00
		8	156	8/17/2005 6:00	9.1	19.6	28.7	60.3	24	108	132	0.39	8/16/2005 6:00	8/21/2005 18:00
		9	188	3/13/2006 17:00	10.9	9.3	20.2	42.4	58	72	130	0.23	3/11/2006 7:00	3/16/2006 17:00

<b>Broșteni</b>	<b>Motru</b>	1	262	2/26/1955 8:00	22.4	17.4	39.7	61.5	111	129	240	0.18	2/21/1955 17:00	3/3/1955 17:00
		2	520	5/29/1957 6:00	44.4	55.2	99.6	154.2	85	155	240	0.22	5/25/1957 17:00	6/4/1957 17:00
		3	573	1/14/1958 19:00	21.5	40.9	62.5	96.7	50	190	240	0.13	1/12/1958 17:00	1/22/1958 17:00
		4	325	12/14/1960 9:00	26.7	24.2	50.9	78.8	88	104	192	0.23	12/10/1960 17:00	12/18/1960 17:00
		5	520	4/30/1961 19:00	6.3	44.0	50.2	77.7	12	166	178	0.15	4/30/1961 7:00	5/7/1961 17:00
		6	325	6/8/1961 12:00	18.0	32.4	50.4	78.0	67	173	240	0.18	6/5/1961 17:00	6/15/1961 17:00
		7	1070	7/30/1969 23:00	20.1	42.7	62.8	97.2	30	138	168	0.10	7/29/1969 17:00	8/5/1969 17:00
		8	548	7/12/1999 21:00	7.2	36.5	43.7	67.7	15	141	156	0.14	7/12/1999 6:00	7/18/1999 18:00
		9	236	1/29/2009 3:00	8.2	29.8	38.0	58.8	21	158	178	0.25	1/28/2009 7:00	2/4/2009 17:00
<b>Runcu</b>	<b>Jaleș</b>	1	64	12/11/1960 17:00	1.4	16.0	17.4	147.1	34	216	250	0.30	12/10/1960 7:00	12/20/1960 17:00
		2	61.82	8/21/1966 9:00	0.4	4.8	5.2	83.6	16	104	120	0.19	8/20/1966 17:00	8/25/1966 17:00
		3	55.7	10/16/1974 10:00	2.9	5.7	8.5	72.4	41	117	158	0.27	10/14/1974 17:00	10/21/1974 7:00
		4	69.4	7/1/1975 15:00	1.3	9.3	10.7	90.4	22	146	168	0.25	6/30/1975 17:00	7/7/1975 17:00
		5	65.8	11/21/1976 7:00	2.5	9.9	12.3	104.7	38	154	192	0.27	11/19/1976 17:00	11/27/1976 17:00
		6	106	6/9/1991 3:00	4.4	13.1	17.6	148.7	45	159	204	0.23	6/7/1991 6:00	6/15/1991 18:00
		7	80.99091	11/9/2004 8:00	2.3	19.8	22.1	187.6	20	225	245	0.31	11/8/2004 12:00	11/8/2004 17:00
		8	70.5	3/23/2007 18:00	1.5	9.4	10.9	92.7	11	132	143	0.30	3/23/2007 7:00	3/29/2007 6:00
		9	141	10/23/2007 8:00	2.3	13.0	15.3	129.8	14	129	143	0.21	10/22/2007 18:00	10/28/2007 17:00
		10	66	11/10/2009 17:00	11.6	10.7	22.3	188.7	107	192	299	0.31	11/6/2009 6:00	11/18/2009 17:00
<b>Celei</b>	<b>Orlea</b>	1	29	2/10/1984	0.7	2.2	2.9	47.3	19	67	86	0.33	2/9/1984 17:00	2/13/1984 7:00
		2	33	6/9/1991	1.4	2.6	4.0	64.4	48	78	126	0.27	6/7/1991 6:00	6/12/1991 12:00
		3	26.2	7/13/1999	1.1	2.7	3.8	61.2	21	99	120	0.34	7/12/1999 6:00	7/17/1999 6:00
		4	29.2	9/4/1999 4:00	1.6	3.9	5.5	89.2	34	86	120	0.44	9/2/1999 18:00	09/07/1999 18:00
		5	28.2	11/15/2004 8:00	1.3	1.9	3.2	51.1	39	33	72	0.43	11/13/2004 17:00	11/16/2004 17:00
		6	25.4	2/16/2005 7:00	0.8	3.5	4.2	68.4	24	96	120	0.39	2/15/2005 7:00	2/20/2005 7:00
		7	27.2	7/14/2005 3:00	1.1	1.8	2.9	6.1	21	63	84	0.36	7/13/2005 6:00	7/16/2005 18:00
		8	34.2	3/13/2006 21:00	1.5	2.1	3.6	58.1	28	34	62	0.47	3/12/2006 17:00	3/15/2006 7:00
		9	27	1/29/2009 2:00	1.1	2.2	3.3	52.8	19	39	58	0.58	1/28/2009 7:00	1/30/2009 17:00

<b>Corcova</b>	<b>Coșuștea</b>	1	152	4/2/1956 17:00	9.7	35.0	44.7	106.4	96	158	254	0.32	3/29/1956 17:00	4/9/1956 7:00
		2	380	5/29/1957 13:00	19.9	20.1	40.0	95.1	78	124	202	0.14	5/26/1957 7:00	6/3/1957 17:00
		3	157	1/14/1958 17:00	5.5	15.2	20.7	49.2	34	96	130	0.28	1/13/1958 7:00	1/18/1958 17:00
		4	161	4/30/1961 17:00	5.3	22.7	28.0	66.7	24	123	147	0.33	4/29/1961 17:00	5/5/1961 20:00
		5	170	11/21/1976 13:00	10.7	15.3	26.0	61.8	54	114	168	0.25	11/19/1976 7:00	11/26/1976 7:00
		6	421	7/12/1999 20:00	4.3	39.4	43.7	104.1	14	118	132	0.22	7/12/1999 6:00	7/17/1999 18:00
		7	150	7/10/2005 9:00	1.4	3.4	4.8	11.4	15	21	36	0.25	7/9/2005 18:00	7/11/2005 6:00
		8	154	4/13/2006 1:00	3.4	10.7	14.1	33.6	19	101	120	0.21	4/12/2006 6:00	4/17/2006 6:00
		9	152	4/2/1956 17:00	9.7	35.0	44.7	106.4	96	158	254	0.32	3/29/1956 17:00	4/9/1956 7:00
<b>Stolojani</b>	<b>Jaleș</b>	1	200	6/1/1953 15:00	11.3	22.4	33.7	219.0	46	266	312	0.15	5/30/1953 17:00	6/12/1953 17:00
		2	138	6/8/1961 7:00	7.0	13.2	20.3	131.6	38	106	144	0.28	6/6/1961 17:00	6/12/1961 17:00
		3	90	12/10/1969 14:00	14.2	15.6	29.8	193.5	117	171	288	0.32	12/5/1969 17:00	12/17/1969 17:00
		4	82.7	6/11/1970 5:00	1.9	10.3	12.2	78.9	12	146	158	0.26	6/10/1970 17:00	6/17/1970 7:00
		5	125	10/9/1972 10:00	21.0	46.1	67.1	435.8	137	429	566	0.26	10/3/1972 17:00	10/27/1972 7:00
		6	122	6/9/1991 6:00	4.8	12.3	17.0	110.6	48	84	132	0.29	6/7/1991 6:00	6/12/1991 18:00
		7	136	11/9/2004 10:00	3.0	32.2	35.2	228.5	27	285	312	0.23	11/8/2004 7:00	11/21/2004 7:00
		8	90.9	3/23/2007 21:00	2.4	9.0	11.4	74.0	14	105	119	0.29	3/23/2007 7:00	3/28/2007 6:00
		9	141	10/23/2007 12:00	4.3	13.4	17.7	114.8	30	126	156	0.22	10/22/2007 6:00	10/28/2007 18:00
<b>Strehaia</b>	<b>Hușnița</b>	1	67.8	2/17/1973 2:00	0.9	2.5	3.4	10.7	7	29	36	0.38	2/16/1973 19:00	2/18/1973 7:00
		2	93.7	5/10/1973 21:00	1.6	4.0	5.6	17.9	9	58	67	0.25	5/10/1973 12:00	5/13/1973 7:00
		3	131	12/15/1974 14:00	1.7	9.3	11.0	35.2	31	99	130	0.18	12/14/1974 7:00	12/19/1974 17:00
		4	58.2	6/21/1975 9:00	1.2	3.7	4.9	15.8	16	56	72	0.33	6/20/1975 17:00	6/23/1975 17:00
		5	88.4	8/30/1975 11:00	0.7	1.4	2.1	6.8	4	30	34	0.20	8/30/1975 7:00	8/31/1975 17:00
		6	64.5	5/19/1980 8:00	1.6	2.0	3.6	11.6	15	28	43	0.36	5/18/1980 17:00	5/20/1980 12:00
		7	154	7/13/1999 3:00	3.8	9.3	13.1	42.0	12	84	96	0.25	7/12/1999 15:00	7/16/1999 15:00
		8	72.6	3/13/2006 16:00	5.1	7.5	12.6	40.5	71	68	139	0.35	3/10/2006 17:00	3/16/2006 12:00
		9	63	4/12/2006 21:00	1.1	5.1	6.2	19.9	15	81	96	0.29	4/12/2006 6:00	4/16/2006 6:00
		10	58.8	1/29/2009 3:00	1.9	5.7	7.7	24.5	20	57	77	0.47	1/28/2009 7:00	1/31/2009 12:00

## Annexe 10

### Annexe A.10.1. Le temps de propagation des crues horaires

Secteur	$\Delta t$ moyenne (Max.amont - Max.Podari) (h)	$\Delta t$ min (Max.amont - Max.Podari) (h)	$\Delta t$ max (Max.amont - Max.Podari) (h)	D (m)
Isroni - Zăval	48.0	48.0	48.0	222036.8
Isroni - Filiași	43.0	16.0	70.0	79451.2
Isroni - Sadu	2.5	2.5	2.5	34336.2
Turburea - Filiași	5.7	4.0	8.0	29616.5
Turburea - Răcari	10.5	10.0	11.0	42335.5
Turburea - Zăval	33.3	17.0	43.0	152546.5
Filiași - Zăval	23.4	13.0	40.0	122930.0
Filiași - Răcari	4.7	2.0	6.0	12719.0
Runcu - Filiași	19.0	19.0	19.0	50216.5
Runcu - Răcari	21.0	21.0	21.0	62935.5
Runcu - Zăval	38.0	38.0	38.0	173146.5
Runcu - Stolojani	3.3	2.5	4.5	10500.0
Runcu - Rovinari	15.1	11.0	19.5	23658.0
Stolojani - Rovinari	11.9	8.0	17.0	13158.0
Stolojani - Filiași	49.0	49.0	49.0	39716.5
Stolojani - Răcari	13.0	13.0	13.0	52435.5
Stolojani - Zăval	60.0	60.0	60.0	162646.5
Breasta - Zăval	32.0	22.0	38.0	81123.4
Rovinari - Răcari	10.0	7.0	13.0	39277.5
Târmigani - Broșteni	6.8	5.0	14.0	33628.0
Târmigani - Răcari	27.0	27.0	27.0	106560.0
Turceni - Filiași	10.0	4.0	19.0	22729.0
Turceni - Răcari	18.0	15.0	21.0	35448.0
Turceni - Zăval	31.7	17.0	40.0	145659.0
Telești - Rovinari	9.2	3.0	16.5	4960.0
Telești - Filiași	36.5	21.0	52.0	31518.5
Telești - Răcari	19.5	13.5	23.0	44237.5
Telești - Zăval	51.5	40.0	63.0	154448.5
Sadu - Rovinari	11.3	8.0	15.5	38212.1
Sadu - Filiași	13.0	13.0	13.0	64770.6
Sadu - Răcari	13.0	9.0	17.0	77489.6
Sadu - Zăval	26.0	26.0	26.0	187700.6
Răcari - Zăval	30.3	17.0	40.0	110211.0
Celei - Rovinari	6.7	3.0	9.0	23174.5
Celei - Răcari	16.0	16.0	16.0	62452.0
Corcova - Răcari	19.0	15.0	23.0	62736.0
Corcova - Zăval	39.5	32.0	47.0	172947.0
Strehaia - Răcari	16.0	16.0	16.0	42059.0
Strehaia - Zăval	43.5	43.5	43.5	152270.0
Broșteni - Răcari	15.0	8.0	22.0	72932.0
Broșteni - Zăval	48.0	48.0	48.0	183143.0



Secteur	$\Delta t$ moyenne (Max.amont - Max.Podari) (h)	$\Delta t$ min (Max.amont - Max.Podari) (h)	$\Delta t$ max (Max.amont - Max.Podari) (h)	D (m)
<b>Stolajani - Podari</b>	48	41	55	96100.5
<b>Filiași - Podari</b>	11	6	18	56384
<b>Târmigani - Podari</b>	36	36	36	150225
<b>Broșteni - Podari</b>	29	29	29	116597
<b>Corcova - Podari</b>	24	24	24	106434
<b>Podari - Zăval</b>	18	7	24	66546
<b>Telești - Podari</b>	82	82	82	87903
<b>Turceni - Podari</b>	17	10	21	79113
<b>Turburea - Podari</b>	16	10	21	86001
<b>Breasta - Podari</b>	15	10	22	14577
<b>Strehaia- Podari</b>	23	23	23	85724
<b>Isroni - Podari</b>	29	29	29	144881
<b>Rovinari - Podari</b>	14	14	14	72333
<b>Răcari - Podari</b>	7	2	12	43665
<b>Celei - Podari</b>	18	18	18	106117

Annexe A.10.2. Nombre des crues et la variation des vitesses de propagation

Crues	Stations	$\Delta t$ (Max.amont - Max.Podari) (h)	D (m)	V(m/s)
18/05/1957-7/06/1957	Turburea - Filiași	5	29616.5	1.65
3/10/1972 - 27/10/1972	Turburea - Filiași	4	29616.5	2.06
9/05/1973 - 22/05/1973	Turburea - Filiași	8	29616.5	1.03
11/07-2005 - 19/07/2005	Turburea - Răcari	10	42335.5	1.18
18/10/2007 - 28/10/2007	Turburea - Răcari	11	42335.5	1.07
12/04/2006 - 23/04/2006	Turburea - Zăval	43	152546.5	0.99
3/10/1972 - 27/10/1972	Turburea - Zăval	17	152546.5	2.49
9/05/1973 - 22/05/1973	Turburea - Zăval	40	152546.5	1.06
9.12/1960-31/12/1960	Iscroni - Filiași	70	79451.24	0.32
9/05/1973 - 22/05/1973	Iscroni - Filiași	16	99106.84	1.72
25/07/2004 - 31/07/2004	Iscroni - Sadu	2.5	34336.2	3.82
9/05/1973 - 22/05/1973	Iscroni - Zăval	48	222036.84	1.28
3/10/1972 - 27/10/1972	Filiași - Zăval	13	122930	2.63
9/05/1973 - 22/05/1973	Filiași - Zăval	32	122930	1.07
14/11/1976 - 30/11/1976	Filiași - Zăval	19	122930	1.80
18/11/2007 - 22/11/2007	Filiași - Zăval	40	122930	0.85
30/06/1991 - 09/07/1991	Filiași - Zăval	13	122930	2.63
14/11/1976 - 30/11/1976	Filiași - Răcari	2	12719	1.77
10/03/2006 - 19/03/2006	Filiași - Răcari	6	12719	0.59
18/11/2007 - 22/11/2007	Filiași - Răcari	6	12719	0.59
14/11/1976 - 30/11/1976	Runcu - Filiași	19	50216.54	0.73
14/11/1976 - 30/11/1976	Runcu - Zăval	38	173146.54	1.27
14/11/1976 - 30/11/1976	Runcu - Răcari	21	62935.54	0.83
7/06/1991 - 15/06/1991	Runcu - Stolojani	3	10500	0.97
13/11/2004 - 21/11/2004	Runcu - Stolojani	2.5	10500	1.17
13/11/2004 - 21/11/2004	Runcu - Stolojani	4.5	10500	0.65
12/03/2007 - 27/03/2007	Runcu - Stolojani	3	10500	0.97
7/06/1991 - 15/06/1991	Runcu - Rovinari	11	23658	0.60
13/11/2004 - 21/11/2004	Runcu - Rovinari	19.5	23658	0.34
13/11/2004 - 21/11/2004	Runcu - Rovinari	17	23658	0.39
12/03/2007 - 27/03/2007	Runcu - Rovinari	13	23658	0.51

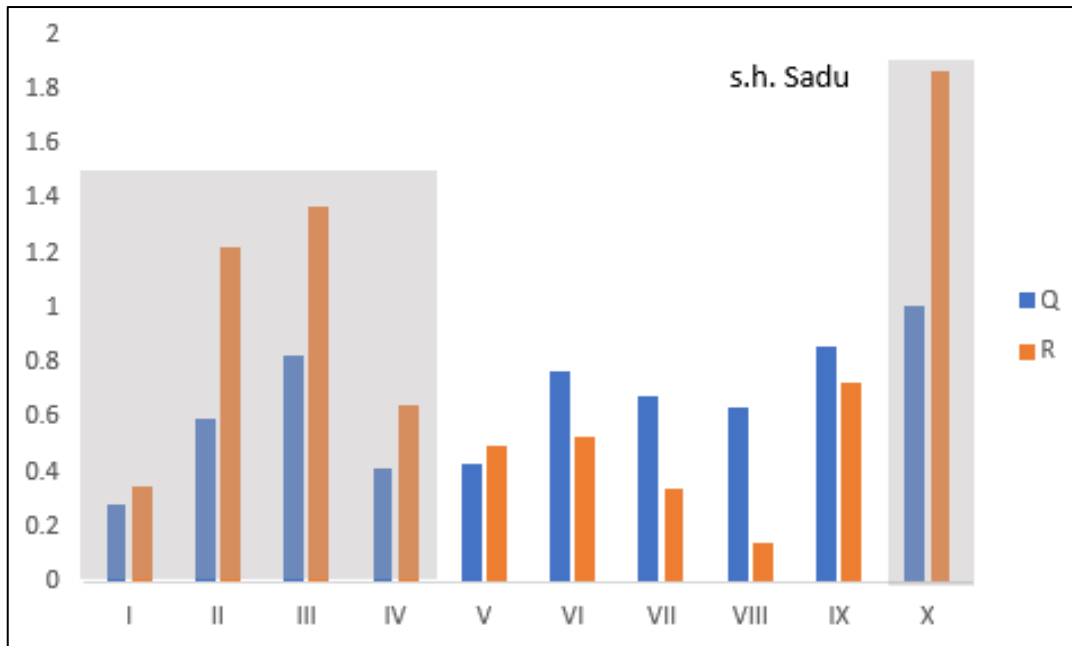
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Stolojani - Filiași</b>	49	39716.54	0.23
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Stolojani - Zăval</b>	60	162646.54	0.75
7/06/1991 - 15/06/1991	<b>Stolojani - Rovinari</b>	8	13158	0.46
13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Stolojani - Rovinari</b>	17	13158	0.22
13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Stolojani - Rovinari</b>	12.5	13158	0.29
12/03/2007 - 27/03/2007	<b>Stolojani - Rovinari</b>	10	13158	0.37
18/10/2007 - 28/10/2007	<b>Stolojani - Răcari</b>	13	52435.54	1.12
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Breasta - Zăval</b>	22	81123.4	1.02
9/05/1973 - 22/05/1973	<b>Breasta - Zăval</b>	36	81123.4	0.63
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Breasta - Zăval</b>	38	81123.4	0.59
9.12/1960-31/12/1960	<b>Târmigani - Broșteni</b>	14	33628	0.67
18/04/1961-3/06/1961	<b>Târmigani - Broșteni</b>	5	33628	1.87
3/06/1961-19/06/1961	<b>Târmigani - Broșteni</b>	7	33628	1.33
5/05/1980 - 16/06/1980	<b>Târmigani - Broșteni</b>	5	33628	1.87
5/05/1980 - 27/05/1980	<b>Târmigani - Broșteni</b>	5	33628	1.87
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Târmigani - Broșteni</b>	5	33628	1.87
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Târmigani - Răcari</b>	27	106560	1.10
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Turceni - Filiași</b>	4	22729	1.58
9/05/1973 - 22/05/1973	<b>Turceni - Filiași</b>	8	22729	0.79
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Turceni - Filiași</b>	19	22729	0.33
10/03/2006 - 19/03/2006	<b>Turceni - Filiași</b>	9	22729	0.70
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Turceni - Răcari</b>	21	35448	0.47
10/03/2006 - 19/03/2006	<b>Turceni - Răcari</b>	15	35448	0.66
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Turceni - Zăval</b>	17	145659	2.38
9/05/1973 - 22/05/1973	<b>Turceni - Zăval</b>	40	145659	1.01
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Turceni - Zăval</b>	38	145659	1.06
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Telești - Zăval</b>	63	154448.54	0.68
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Telești - Zăval</b>	40	154448.54	1.07
3/10/1972 - 27/10/1972	<b>Telești - Filiași</b>	52	31518.54	0.17
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Telești - Filiași</b>	21	31518.54	0.42
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Telești - Răcari</b>	23	44237.54	0.53
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Telești - Răcari</b>	22	44237.54	0.56
18/10/2007 - 28/10/2007	<b>Telești - Răcari</b>	13.5	44237.54	0.91
7/06/1991 - 15/06/1991	<b>Telești - Rovinari</b>	14	4960	0.10
7/06/1991 - 15/06/1991	<b>Telești - Rovinari</b>	3	4960	0.46
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Telești - Rovinari</b>	9	4960	0.15
1/09/1999 - 8/09/1999	<b>Telești - Rovinari</b>	7.5	4960	0.18
13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Telești - Rovinari</b>	16.5	4960	0.08

13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Telești - Rovinari</b>	5	4960	0.28
9/05/1984 - 22/05/1984	<b>Sadu - Rovinari</b>	10	38212.1	1.06
30/03/1987 - 6/04/1987	<b>Sadu - Rovinari</b>	8	38212.1	1.33
7/06/1991 - 15/06/1991	<b>Sadu - Rovinari</b>	8	38212.1	1.33
30/06/1991 - 09/07/1991	<b>Sadu - Rovinari</b>	12	38212.1	0.00
13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Sadu - Rovinari</b>	15.5	38212.1	0.68
13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Sadu - Rovinari</b>	14	38212.1	0.76
9/05/1984 - 22/05/1984	<b>Sadu - Răcari</b>	17	77489.64	1.27
18/10/2007 - 28/10/2007	<b>Sadu - Răcari</b>	9	77489.64	2.39
30/06/1991 - 09/07/1991	<b>Sadu - Filiași</b>	13	64770.64	1.38
30/06/1991 - 09/07/1991	<b>Sadu - Zăval</b>	26	187700.64	0.41
9/05/1973 - 22/05/1973	<b>Strehaia - Zăval</b>	43.5	152270	0.97
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Strehaia - Răcari</b>	16	42059	0.73
10/03/2006 - 19/03/2006	<b>Strehaia - Răcari</b>	17	42059	0.69
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Corcova - Răcari</b>	15	62736	1.16
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Corcova - Răcari</b>	23	62736	0.76
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Corcova - Zăval</b>	32	172947	1.50
12/04/2006 - 23/04/2006	<b>Corcova - Zăval</b>	47	172947	1.02
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Broșteni - Răcari</b>	22	72932	0.92
26/01/2009 - 10/02/2009	<b>Broșteni - Răcari</b>	8	72932	2.53
26/01/2009 - 10/02/2009	<b>Broșteni - Zăval</b>	48	183143	1.06
14/11/1976 - 30/11/1976	<b>Răcari - Zăval</b>	17	110211	1.80
18/11/2007 - 22/11/2007	<b>Răcari - Zăval</b>	34	110211	0.90
26/01/2009 - 10/02/2009	<b>Răcari - Zăval</b>	40	110211	0.77
9/05/1984 - 22/05/1984	<b>Rovinari - Răcari</b>	7	39277.54	1.56
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Rovinari - Răcari</b>	13	39277.54	0.84
7/06/1991 - 15/06/1991	<b>Celei - Rovinari</b>	8	23174.5	0.80
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Celei - Rovinari</b>	3	23174.5	4.10
13/11/2004 - 21/11/2004	<b>Celei - Rovinari</b>	9	23174.5	0.72
10/07/1999 - 20/07/1999	<b>Celei - Răcari</b>	16	62452.04	1.08

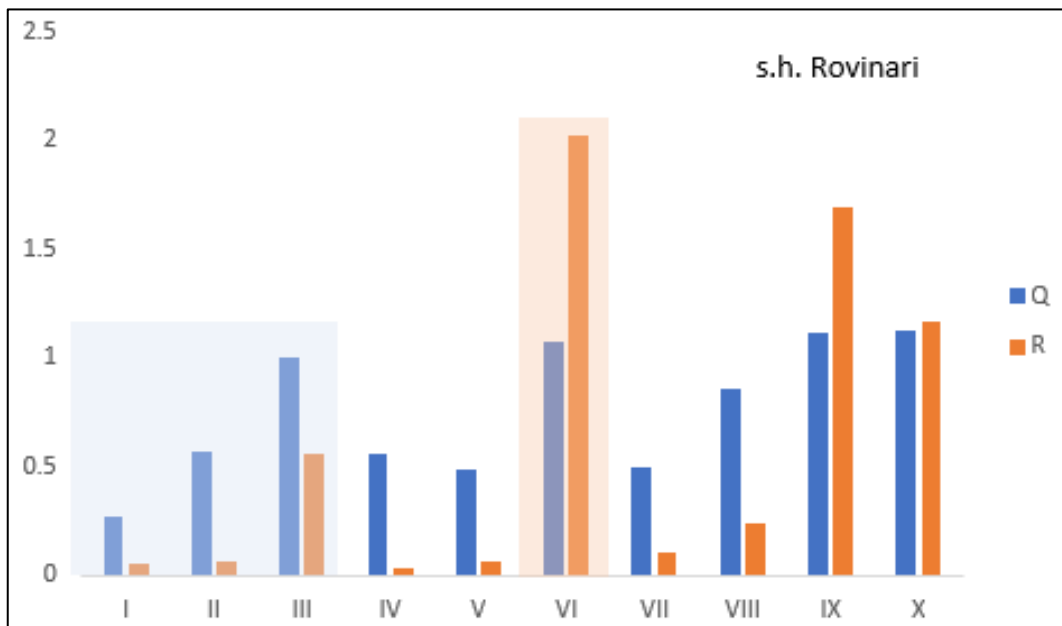
# Annexe 11

Annexe A.11.1. D'autres relations débit liquide (Q) – débit des alluvions en suspensions (R) gouvernées par les activités minières en amont dans la période 2001 - 2010

. Stations hydrométriques analysées : s.h. Sadu en amont et s.h. Rovinari en aval



Intensification des activités minières pendant l'hiver : R > et Q <



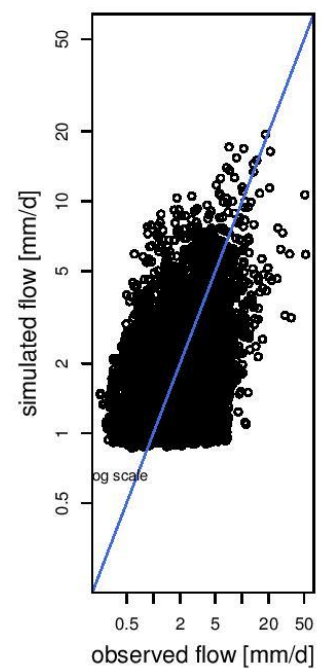
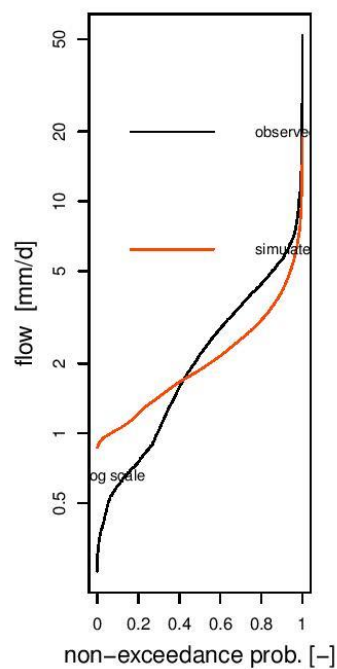
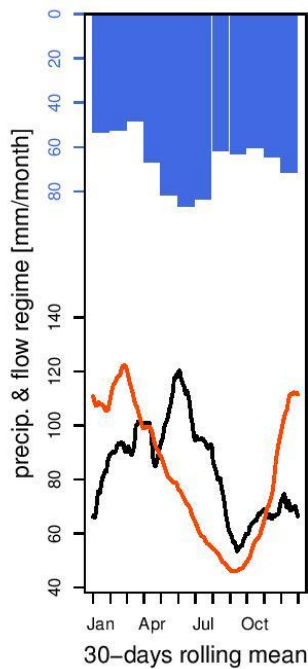
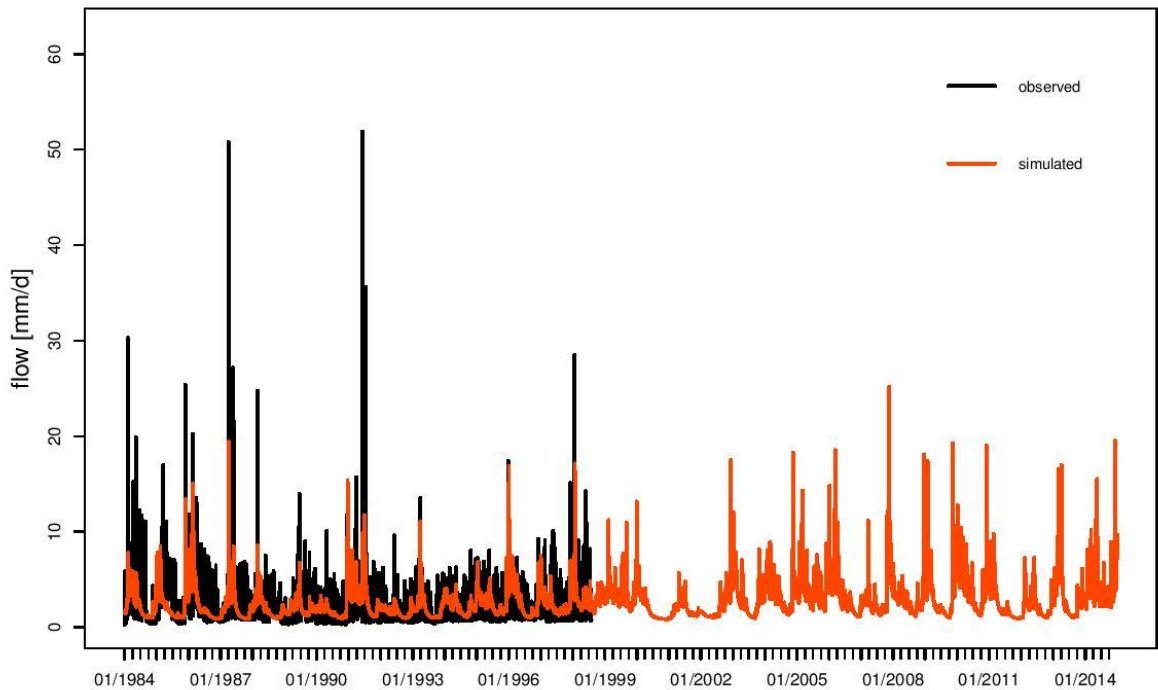
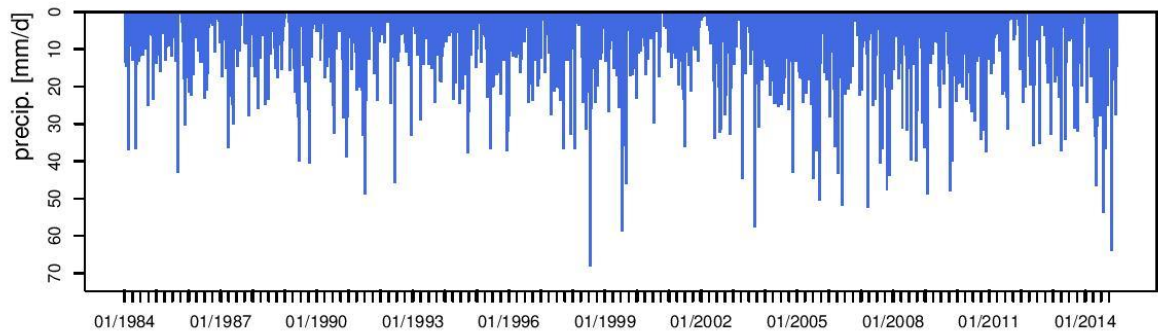
Stockage dans les reservoirs | Apport naturel de sédiments durant la saison des crues



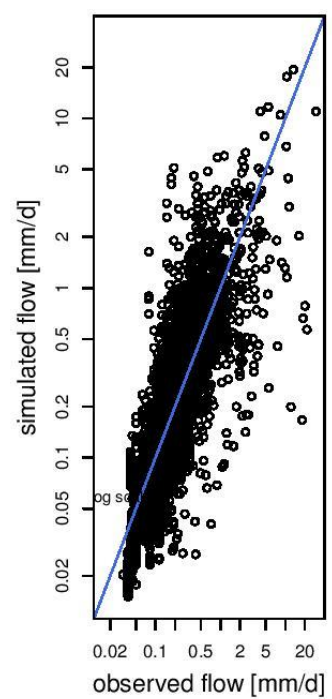
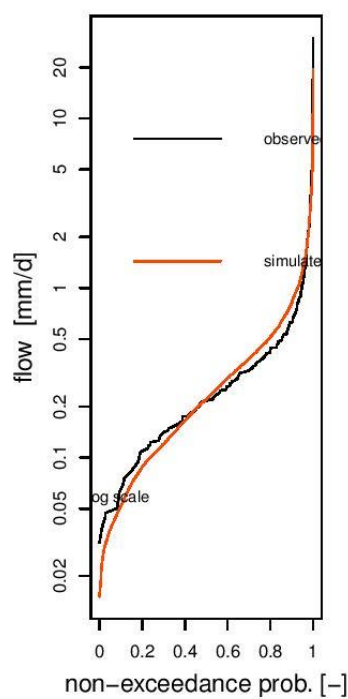
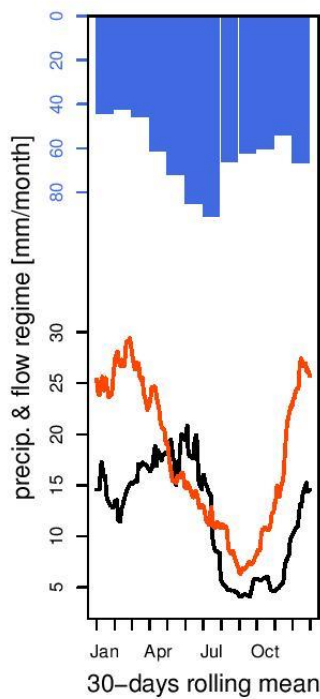
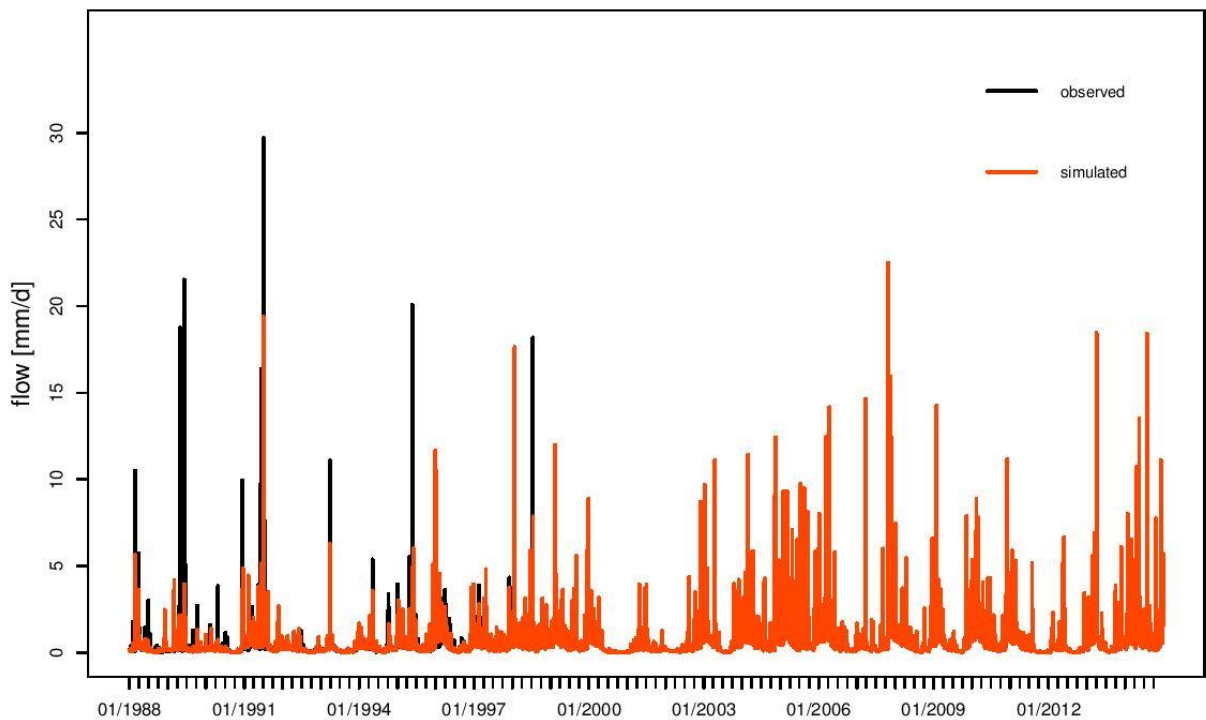
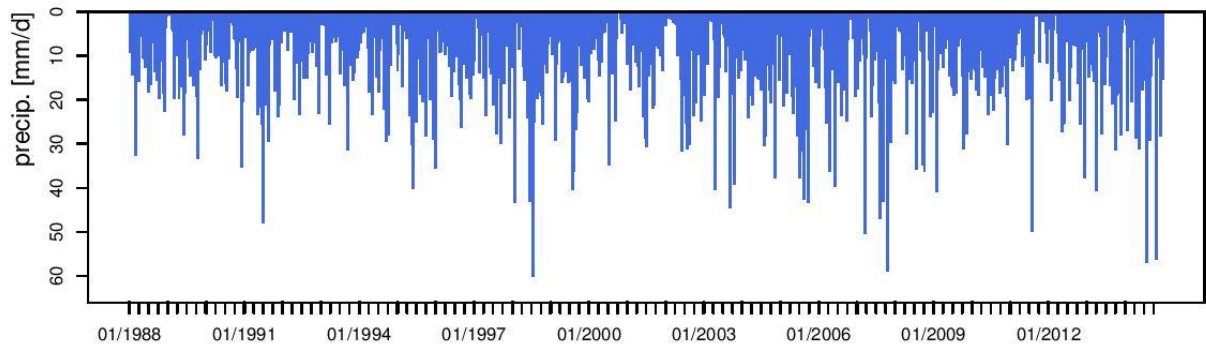


# Annexe 12

Annexe A.12.1. Résultats de la modélisation GR4J des débits liquides de la station hydrométrique de la Câlnic, rivière Tismana, entre 1998 et 2014

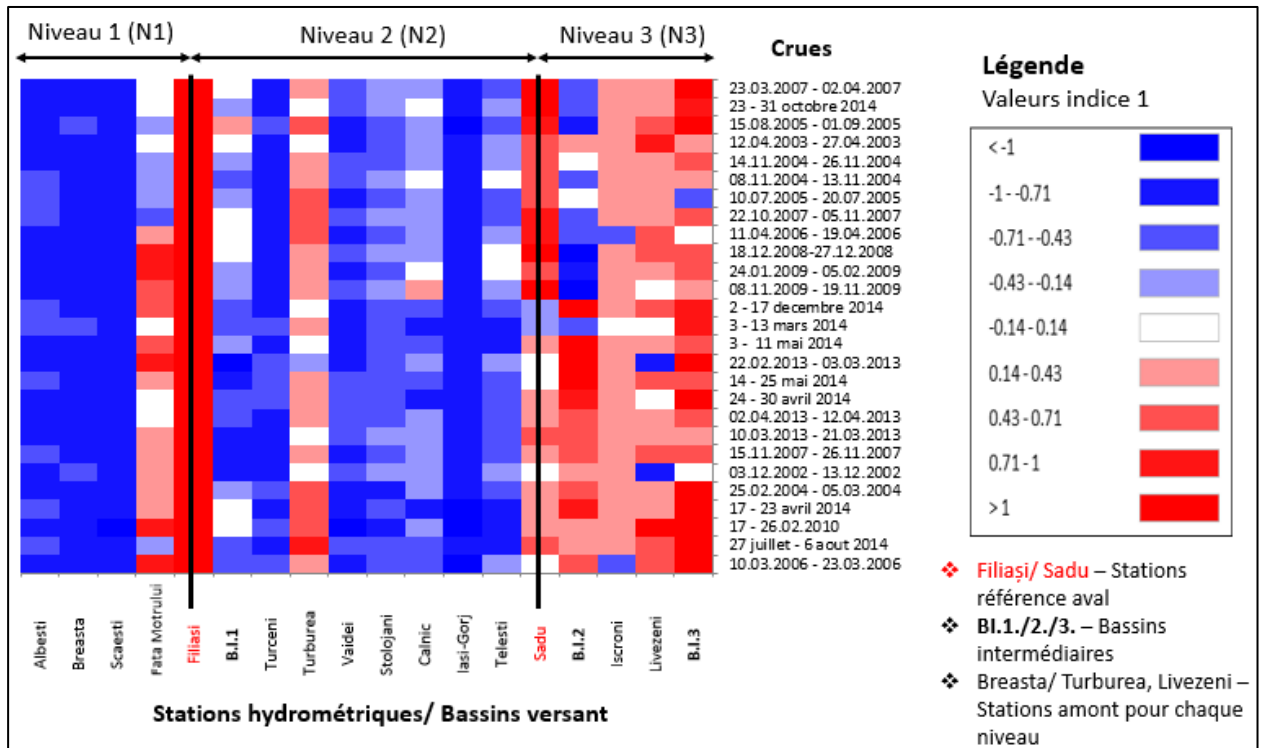


*Annexe A.12.2. Résultats de la modélisation GR4J des débits liquides de la station hydrométrique de la Iasi - Gorj, riviere Amaradia Pietroasă, entre 1998 et 2014*

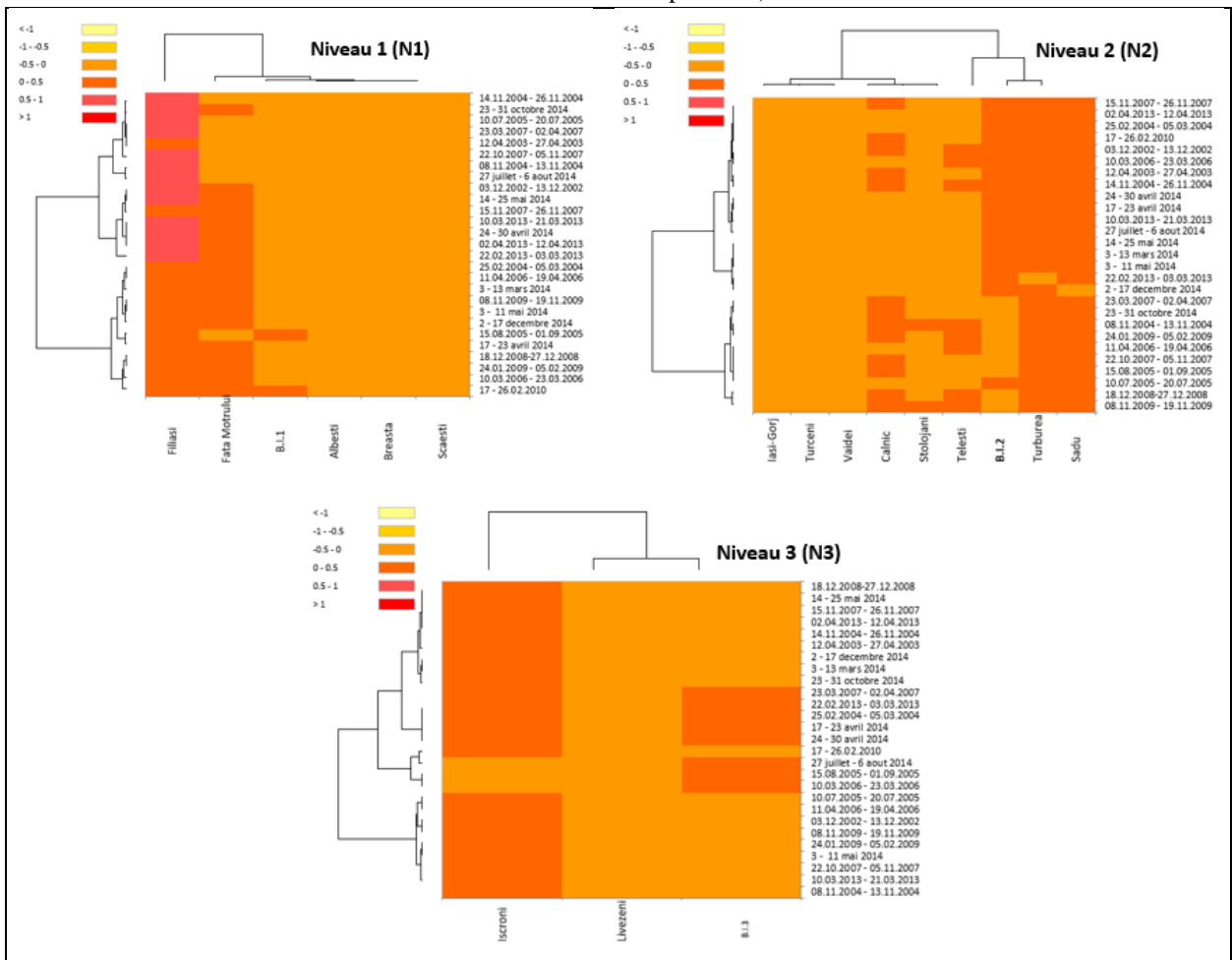


# Annexe 13

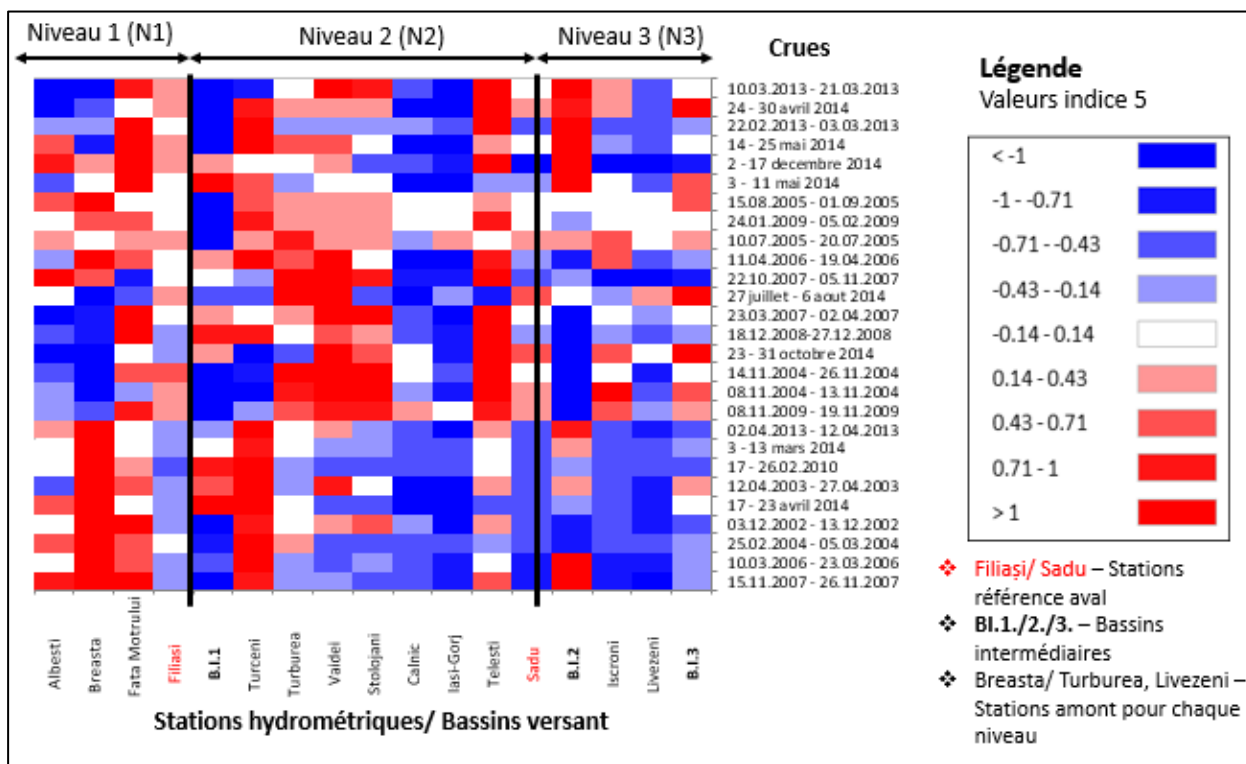
**Figure A.13.1.** Matrice de classification type « carte de chaleur » des contributions potentielles de tous les s.h./b.v. analysés pour chaque crue, selon les résultats de l'indice 1 (les crues sont ordonnées selon leur importance)



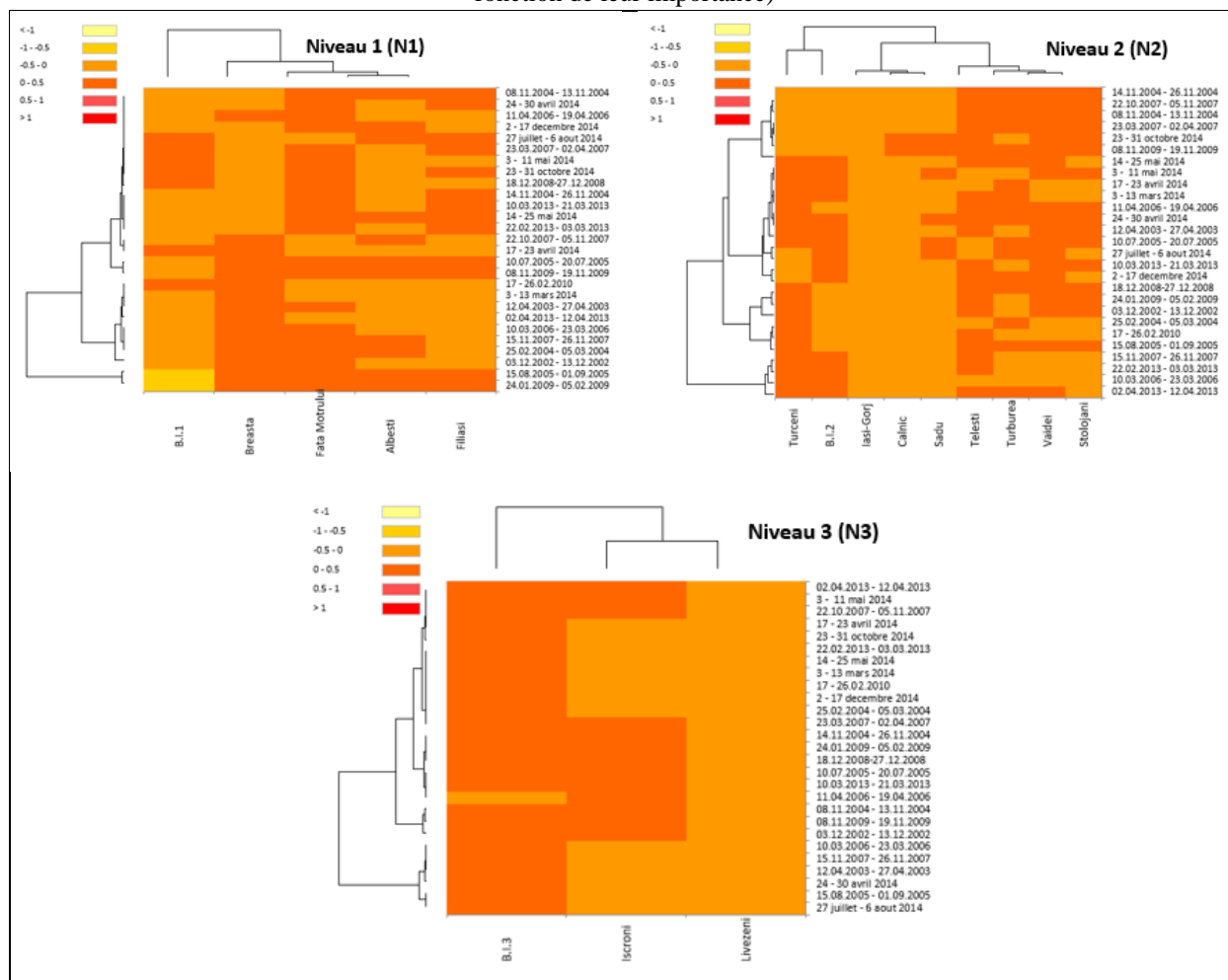
**Figure A.13.2.** Matrice de classification type « carte de chaleur » des contributions potentielles des s.h./b.v. analysées pour chaque crue à chaque niveau d'analyse, selon les résultats de l'indice 1 (les crues sont ordonnées en fonction de leur importance)



**Figure A.13.3.** Matrice de classification type « carte de chaleur » des contributions potentielles de **tous** les s.h./b.v. analysés pour chaque crue, selon les résultats de **l'indice 5** (les crues sont ordonnées selon leur importance)



**Figure A.13.4.** Matrice de classification type « carte de chaleur » des contributions potentielles des s.h./b.v. analysées pour chaque crue à chaque niveau d'analyse, selon les résultats de **l'indice 5** (les crues sont ordonnées en fonction de leur importance)





# Annexe 14

Annexe A.14.1. Les éléments chimiques (métaux lourds et lanthanides) analysés par les méthodes géochimiques dans les échantillons de sédiments fins


**Tableau périodique des éléments chimiques**


1 <b>H</b> Hydrogen 1.0079																	2 <b>He</b> Helium 4.0026
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.0122											5 <b>B</b> Boron 10.81	6 <b>C</b> Carbon 12.011	7 <b>N</b> Nitrogen 14.007	8 <b>O</b> Oxygen 15.999	9 <b>F</b> Fluorine 18.998	10 <b>Ne</b> Neon 20.179
11 <b>Na</b> Sodium 22.990	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.305											13 <b>Al</b> Aluminum 26.982	14 <b>Si</b> Silicon 28.086	15 <b>P</b> Phosphorus 30.974	16 <b>S</b> Sulfur 32.06	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.453	18 <b>Ar</b> Argon 39.948
19 <b>K</b> Potassium 39.098	20 <b>Ca</b> Calcium 40.08	21 <b>Sc</b> Scandium 44.956	22 <b>Ti</b> Titanium 47.90	23 <b>V</b> Vanadium 50.941	24 <b>Cr</b> Chromium 51.996	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938	26 <b>Fe</b> Iron 55.847	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933	28 <b>Ni</b> Nickel 58.71	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.72	32 <b>Ge</b> Germanium 72.59	33 <b>As</b> Arsenic 74.922	34 <b>Se</b> Selenium 78.96	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.80
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.468	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.906	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.22	41 <b>Nb</b> Niobium 92.906	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.94	43 <b>Tc</b> Technetium (98)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.91	46 <b>Pd</b> Palladium 106.4	47 <b>Ag</b> Silver 107.87	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.41	49 <b>In</b> Indium 114.82	50 <b>Sn</b> Tin 118.69	51 <b>Sb</b> Antimony 121.75	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.90	54 <b>Xe</b> Xenon 131.30
55 <b>Cs</b> Cesium 132.91	56 <b>Ba</b> Barium 137.33	*57 <b>La</b> Lanthanum 138.91	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.93	74 <b>W</b> Tungsten 183.85	75 <b>Re</b> Rhenium 186.21	76 <b>Os</b> Osmium 190.2	77 <b>Ir</b> Iridium 192.22	78 <b>Pt</b> Platinum 195.09	79 <b>Au</b> Gold 196.97	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.37	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astatine (210)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	†89 <b>Ac</b> Actinium (227)	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (267)	105 <b>Db</b> Dubnium (268)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (271)	107 <b>Bh</b> Bohrium (272)	108 <b>Hs</b> Hassium (270)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (276)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (281)	111 <b>Rg</b> Roentgenium (280)	112 <b>Cn</b> Copernicium (285)	113 <b>Nh</b> Nihonium (284)	114 <b>Fl</b> Flerovium (289)	115 <b>Mc</b> Moscovium (288)	116 <b>Lv</b> Livermorium (293)	117 <b>Ts</b> Tennessine (294)	118 <b>Og</b> Oganesson (294)
*LANTHANIDES			58 <b>Ce</b> Cerium 140.12	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.91	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.24	61 <b>Pm</b> Promethium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150.4	63 <b>Eu</b> Europium 151.96	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.93	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.50	67 <b>Ho</b> Holmium 164.93	68 <b>Er</b> Erbium 167.26	69 <b>Tm</b> Thulium 168.93	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.04	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.97	
†Actinides			90 <b>Th</b> Thorium 232.04	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.04	92 <b>U</b> Uranium 238.03	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Americium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (262)	

<b>Etat:</b>	<b>Non - métaux</b>	<b>Elements d'origine:</b>	
<b>H</b> Gaseous	Autres métaux	Non classés	<b>Na</b> Primordial
<b>Br</b> Liquide	Halogenes	Mt	<b>Po</b> Disintegration d'autres elements
<b>Si</b> Solide	Gas nobles	Etat inconnu	<b>Am</b> Synthétique

<b>Métalloïdes</b>	<b>Métaux</b>					
	Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux Pauvres

Qu'est-ce qu'on a étudié?

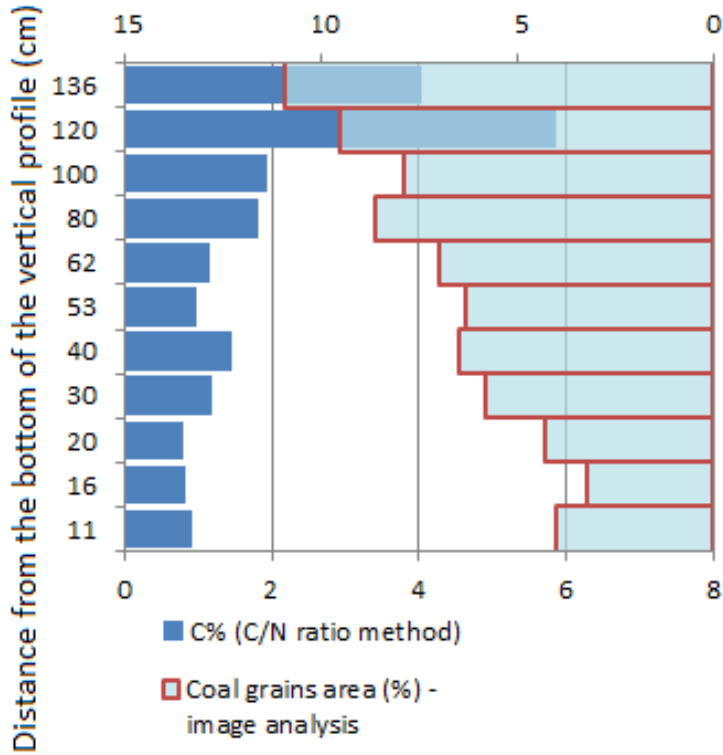
 Eléments qui forment les métaux/ minéraux lourds

 Lanthanides ou terres rares

Conception propre du tableau périodique et de la légende selon [Tableau périodique dynamique](#) et [Template Lab](#)

# Annexe 15

Annexe A.15.1. Résultats des analyses en ce qui concerne la teneur en carbone totale (TTC) et la densité des grains de charbon (DGC) par l'analyse d'image



Annexe A.15.2. Indices colorimétriques des échantillons de houille et lignite

