



HAL
open science

Apport de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques. Elaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône.

Elise Wiederkehr

► **To cite this version:**

Elise Wiederkehr. Apport de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques. Elaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône.. Géographie. Ecole normale supérieure de lyon - ENS LYON, 2012. Français. NNT : 2012ENSL0787 . tel-00782100

HAL Id: tel-00782100

<https://theses.hal.science/tel-00782100>

Submitted on 29 Jan 2013

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 l'École Normale Supérieure de Lyon - Université de Lyon

Discipline : Géographie

Présentée par

Elise WIEDERKEHR

Thèse dirigée par **Hervé PIEGAY** et co-encadrée par **Simon DUFOUR**

préparée au sein du **Laboratoire Environnement Ville Société (UMR 5600)**

dans l'**École Doctorale Sciences Sociales (ED 483 ScSo)**

Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques

Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône

Version finale (janvier 2013)

Thèse présentée et soutenue publiquement le **12 décembre 2012**,
devant la commission d'examen formée de :

Flavie CERNESSON

Maître de Conférences, AgroParisTech-Engref

Simon DUFOUR

Maître de Conférences, Université Rennes 2

Françoise GOURMELON

Directeur de Recherche, CNRS UMR 6554 (Rapporteur - Président)

Hervé PIEGAY

Directeur de Recherche, CNRS UMR 5600 (Directeur)

Laurent SCHMITT

Professeur des Universités, Université de Strasbourg (Rapporteur)

Benoît TERRIER

Chef de projet, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

REMERCIEMENTS

Après trois ans et quelques 700 jours supplémentaires me voilà arrivée à la fin de cette thèse (certains diront que ce n'est qu'un début...). Le chemin a été long, parfois difficile mais surtout parsemé de belles rencontres. C'est pourquoi je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à cette aventure.

Ma gratitude va à mon directeur de thèse, Hervé Piégay, qui m'a donné la possibilité de faire cette thèse. Je le remercie de m'avoir ouvert les portes du monde de la recherche, et de m'avoir convaincu d'y entrer. Ces cinq années ont été riches en apprentissages de toutes sortes (nouvelles technologies, publications, conférences en anglais *of course* !). Je lui exprime toute ma reconnaissance. Je salue également Simon Dufour, qui a co-encadré cette thèse. Un grand merci pour sa disponibilité de chaque instant et pour la constance avec laquelle il m'a transmis scientifiquement ses compétences.

Je remercie Françoise Gourmelon, Laurent Schmitt, Flavie Cernesson et Benoît Terrier d'avoir accepté de participer au jury de thèse.

Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans l'appui financier de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. J'exprime ma gratitude à Stéphane Stroffek et à Laurent Bourdin pour les échanges constructifs effectués dans un climat toujours amical. Les aléas de la recherche ont fait que je n'ai pas terminé dans les temps académiquement impartis. Par conséquent, je pense à toutes les personnes qui m'ont permis de mener ce travail jusqu'au bout par un appui financier mais aussi moral. Je n'oublie pas les membres du collège Louis Lachenal à Saint-Laurent-de-Mure, en particulier Mme Sanchez, qui a aménagé mes horaires de « *pionne* » afin que je puisse poursuivre au mieux mes recherches. Merci aux collégiens (Eddy, Estelle, Jérémy, Florian, Célia, ...) qui par une phrase, une attitude, m'ont permis de raconter chaque jour de nouvelles anecdotes à mes collègues thésards : « *C'est vrai ce que dit mon père : plus on a de diplômes, moins on trouve de travail ?* ». Je remercie également les membres de l'équipe géophile de l'ENS de Lyon de m'avoir donné la possibilité, grâce à un poste d'ATER, de poursuivre, dans d'excellentes conditions ma thèse et de m'avoir permis d'enseigner des matières que j'aime. Je suis reconnaissante à mes « copines ATER », Julie et Camille, qui ont fait en sorte que je ne manque jamais de sucres ! Un merci également à Guilhem de m'avoir tenu compagnie dans cette dernière ligne droite et de ne pas s'être vexé que je refuse systématiquement un thé. *Special thanks to* Karen Johnstone pour son soutien de chaque instant en anglais et sa gentillesse.

Un grand merci à tous ces chercheurs expérimentés d'avoir aidé d'une manière ou d'une autre la chercheuse en herbe que je suis. En vrac, merci à Christian Giusti (pour ses e-mails), à Patrice Carbonneau (pour le repas sur l'île des pêcheurs), à John Stella (de m'avoir fait découvrir avec le sourire R), à André Roy (d'avoir discuté « ondelettes »), à Michaël Ovidio (d'avoir pris le temps de me traduire chacune des questions en anglais), à André Chandesis (de m'avoir soutenue dans

mon envie de faire une thèse), à Jean-Luc Pinol (de m'avoir montré que les SIG n'étaient pas réservés aux géographes). Merci aussi aux personnes que j'ai rencontrées avant ma thèse et qui m'ont donné envie de continuer dans cette voie. Merci à Guillaume (eh non, Lyon ne gagne pas toujours mais Marseille non plus...), Romain du CEREGE, Camille d'Aix (on a bien fini par la faire notre thèse !), et aussi Yves, Bertrand, Nicolas, les Hervé du Cemagref.

Je suis reconnaissante à l'École Normale Supérieure de Lyon et à l'ensemble de son personnel de m'avoir donné la possibilité d'effectuer ce travail dans d'excellentes conditions matérielles et dans un superbe cadre ! Cela explique peut-être qu'il se soit prolongé, prolongé ! J'apprécie également que les membres de l'UMR 5600 (Environnement Ville Société) m'aient accueillie pendant ses cinq années. Merci à Paul (toujours un mot gentil), Lise (merci de t'asseoir à côté de moi à la *cantoché*), Marie-Laure (tu fais quoi le 25 mars ?), Patrick (et toi le 11 juillet ?), Kristell (un tennis, un volley, une course, une séance de rameur ou simplement une pause café / thé pour papoter !), Hervé Pa. (merci pour les conseils pour le petit), Sandy, Marie-Christine.

Je salue aussi toutes les personnes du « couloir » que j'ai croisé. Merci pour les bons moments passés en votre compagnie, notamment tous ces repas régionaux (Franche-Comté, Espagne, Auvergne, Slovaquie, Italie, Canada, Haute-Loire et Loire, Ardèche, La Réunion, Lyon, Berry, Isère et Savoie, Asie ... tiens, il n'y a pas eu de repas breton et pourtant ?!). Merci à Fanny (ce qui a été dit dans la Vallée de la Mort reste dans la Vallée de la Mort), Vincent (3 ans pour finir, pas mal !), Bertrand (tu me prépares une cervelle de canuts ?), Elsa (je suis dispo. pour un resto !), Mélanie (ok ! maintenant j'essaye de venir te voir sur scène), Émeline (tu as le choix entre améliorer ton impact factor et une réunion Tupperware, tu choisis quoi ?), Kéo (merci de ton aide !), Inès (un deuxième bébé ? t'as gagné !), Jérémie (j'ai un atelier « vitesse de courant » à organiser, t'es libre ?), David (exceptionnellement je ne dirais rien sur les verts, merci simplement pour toutes nos discussions sur tout et n'importe quoi), Yves (Puerto Rico ou Aventuriers du Rail ?), Anne (maintenant je vais avoir un peu plus de temps pour la salle de gym !) et puis il y a aussi Clément, Guillaume, Catherine, Sylviane, Véronique, Stéphanie ... Et je n'oublie pas les anciens : Barbara (tu m'as fait danser sur le Papa Pingouin et donné le premier rôle pour « Barry », alors merci !) Adrien (un basket ?), Julien (une visite de Wisches ?), Magalie (merci de m'avoir tenu compagnie dans la salle du fond), Jérôme (ok : tu avais raison pour le bébé, tu avais raison pour la thèse, mais ne crois pas pour autant que je vais commencer à t'écouter), Monika (la plus belle des mariées slovaques), Anne-Julia (je me souviens encore de mon premier TD avec toi, c'était il y a 9 ans déjà !), Christopher, Anne, Loïc, Laura (ok ! le Barça, c'est la Catalogne !) ... Marylise, tu ne croyais quand même pas que j'allais t'oublier ? Je suis assise devant mon ordinateur à écrire ces quelques lignes et j'ai encore mille choses à faire et tu n'es pas là avec un KitKat® pour me dire que tout va bien se passer et pourtant tu l'avais promis ! Tu ne m'as même pas laissé de monnaie ! Pourtant, je ne t'en veux pas. Tu as toujours été présente pour me soutenir dans les moments difficiles (personnels surtout) mais aussi (et heureusement) pour partager les bons moments (tu es quand même la seule que j'ai acceptée à la maternité !). Merci aussi à ton mari de m'avoir accueillie si souvent chez vous ! J'en profite pour remercier Carrie, Miranda, Charlotte et Samantha, sans qui nos années thésardes n'auraient pas eu la même saveur.

Merci à mes amis qui vont être surpris d'apprendre qu'une thèse, ça peut se terminer ! Merci à Virginie, au Projet Défilé (Jessica, Sylvie, Jenny), à ma copine Julie, à Anne-Laure, Priscille, Marine et à leurs compagnons et enfants pour ces moments passés ensemble.

Mes derniers remerciements vont à ma famille, dont la présence et le soutien sans failles ont été une aide si précieuse. Merci à mes grands-parents, mon père, ma mère, ma sœur Julie, mon frère Gaël, ma p'tite sœur Sophie Manon, mes nièces et neveux (Maitena, Tristan, Simon, Elsa, Raphaël, Leila et le p'tit dernier Nathan), mon beauf Ludo, mes belles-sœurs Elisa et Bérénice, mes beaux-parents, qui par un repas, un jeu, une discussion, des vacances m'ont permis de penser à autre chose qu'à ma thèse. Et promis, maintenant je vide les cartons, je débarrasse ma chambre, je sauvegarde vos photos, je défragmente le disque dur, je vais voir des matchs de basket, de tennis, de foot et surtout je m'occupe de mon aquarium (des poissons dans un aquarium ? quelle drôle d'idée !).

Loïc, c'est à ton tour et je ne sais vraiment pas par où commencer pour te dire comme ta présence s'est révélée indispensable. Tu as toujours cru en moi (même quand je te répétais ; *« aujourd'hui c'est sûr je finis »* ; tu as fait au moins semblant de me croire !). Tu as su être patient (encore plus ces dernières semaines et ces derniers jours). Je peux seulement te dire : MERCI. Mais promis, même si tu as un métier accessible seulement à bac +4 je ne me moquerai pas (tu es quand même le roi de la Q.P.C !). Et enfin, un merci tout particulier à mon gone Florestan, qui du haut de ses 7 mois a su patiemment (de jour et surtout de nuit !) attendre sa Maman avec de magnifiques sourires et ça, c'est simplement la plus belle des récompenses. Je n'ai maintenant qu'une chose à vous dire à tous les deux : *« la vie est devant nous ! »*.

SOMMAIRE

Remerciements	3
Sommaire	7
Résumé	9
Abstract	11
Préambule	13
A. Contexte de recherche	15
B. Organisation générale du manuscrit	16
Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude	17
A. Cadre scientifique	21
B. Cadre géographique et sources de données	65
Partie 2. Méthode générale	75
A. Prétraitement de données brutes	79
B. Extraction d'objets élémentaires	85
C. Création d'unités spatiales	93
D. Extraction de métriques	98
E. Élaboration d'indicateurs d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau	106
Partie 3. Étude à l'échelle du tronçon fluvial	109
<i>Chapitre 1. Localisation et caractérisation des sites à forts potentiels patrimoniaux par requêtes spatiales et attributaires. Application à la Drôme.</i>	<i>113</i>
A. Introduction	117
B. Outils et méthode	120
C. Identification de sites à fort potentiel patrimonial	127
D. Synthèse et discussion	133
<i>Chapitre 2. Création d'indicateurs pour l'évaluation de l'état biophysique d'un réseau hydrographique par interrogation d'un Système d'Information Géographique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse</i>	<i>135</i>
A. Introduction	139
B. Outils et méthode	140
C. Exemples d'utilisation de la base de données spatialisée de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse	152
D. Synthèse et discussion	177
Partie 4. Étude à l'échelle du faciès	179
A. Introduction	183
B. Détection des méso-habitats de type « mouilles » à partir des valeurs radiométriques	191
C. Détection et caractérisation des méso-habitats aquatiques par une approche semi-automatique	197
D. Synthèse et discussion	211
E. Perspectives : étude longitudinale des habitats aquatiques	215
Partie 5. Conclusion générale	223
A. Rappel des objectifs de la thèse	227
B. Apports méthodologiques et pratiques	229
C. Perspectives scientifiques	235
Références bibliographiques	237
Tables des illustrations	251
Table des matières	255
Annexes	259

Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques

Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône

RESUME

Selon la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), le bon état écologique de tous les milieux aquatiques devra être atteint d'ici à 2015. Cet état s'évalue en grande partie par des paramètres biologiques, eux-mêmes régis par les conditions physico-chimiques et hydromorphologiques des masses d'eau (Partie 1.Chapitre 1.B). Pour atteindre les objectifs de la DCE, effectuer une évaluation de l'état physique du réseau hydrographique apparaît comme une phase essentielle alors que cette question relève encore pour certains aspects de la recherche fondamentale. La mise en œuvre de cette étape à l'échelle du bassin du Rhône entraîne un certain nombre de questions scientifiques auxquelles il est nécessaire de répondre avant d'envisager toute application. En effet, les connaissances dans les domaines de la géomorphologie ou de l'hydrologie sont aujourd'hui suffisantes à l'échelle locale pour envisager de régionaliser ce type d'information (Partie 1.Chapitre 1.B). Cependant, le changement d'échelle est à l'origine de contraintes méthodologiques importantes liées notamment à la très grande hétérogénéité des milieux à caractériser (Partie 1.Chapitre 1.B).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé, dans un premier temps, **des outils géomatiques permettant d'obtenir une vision globale et homogène des caractéristiques physiques du réseau hydrographique** (Partie 2). Pour cela, nous proposons de définir des indicateurs pertinents de caractérisation hydrogéomorphologique en développant une méthode d'extraction de l'information se basant sur des données vectorielles ou *rasters*. Dans un second temps, ces outils et cette méthode ont été testés et appliqués sur le réseau hydrographique du Rhône afin d'évaluer leur efficacité et de **proposer des éléments fiables de caractérisation des conditions physiques à large échelle** (Partie 3 et Partie 4).

Ainsi, une fois la méthode élaborée, nous avons travaillé à l'**échelle du tronçon fluvial** (Partie 3) en testant notre approche sur deux territoires : le corridor fluvial drômois (une centaine de kilomètres de long) en utilisant des données vectorielles et *rasters* (Partie 3.Chapitre 1), puis en étendant notre espace de travail à l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien (un linéaire de plusieurs milliers de kilomètres) à partir de données uniquement vectorielles (Partie 3.Chapitre 2). Pour ces deux chapitres, nous avons segmenté le cours d'eau en tronçons géomorphologiques homogènes (noté TGH). Dans le premier chapitre, nous avons sectorisé le cours d'eau selon les largeurs de la bande active et de celles du fond de vallée. Quant au réseau rhodanien, nous avons ajouté comme paramètre de segmentation « la confluence ». Ensuite, nous avons extrait plusieurs

métriques par tronçon homogène afin de **mettre en place une typologie des styles fluviaux**. Nous obtenons cinq classes pour la Drôme et 18 sur le bassin rhodanien. Une fois les tronçons définis et la typologie mise en place, nous avons utilisé ces unités spatiales pour extraire des métriques et pour construire des indicateurs de l'état physique des cours d'eau. À titre d'exemple, nous avons mis en place une procédure de **localisation de sites potentiellement exceptionnels d'un point de vue patrimonial** sur la Drôme comme les sites en gorges ou à haut potentiel écologique en retenant deux indicateurs (le style fluvial et la densité d'écotones). À l'échelle du réseau hydrographique rhodanien, nous avons extrait des métriques alimentant une base de données, qui par différentes requêtes permet **d'identifier des secteurs en tresses à haute valeur écologique** ou **de déterminer des secteurs présentant une forte mobilité latérale potentielle**.

Enfin, nous avons testé notre méthode d'extraction d'indicateurs à une **échelle plus fine, celle du faciès** (Partie 4). Pour cela, nous avons travaillé à partir des orthophotographies de l'IGN, sur la partie aval de la Drôme. Nous avons mis en place une **carte des méso-habitats** aquatiques en définissant des polygones intra-chenaux. À partir de cette carte, nous avons dressé une liste d'indicateurs permettant **l'analyse du paysage aquatique** en fonction notamment du style fluvial. De plus, dans un dernier sous-chapitre, nous explorons de nouvelles pistes concernant l'étude des habitats aquatiques à partir de paramètres radiométriques extraits longitudinalement.

Dans la conclusion (Partie 5), nous proposons un bilan des apports méthodologiques de ce travail, en soulignant l'intérêt et les fortes potentialités de la géomatique dans le cadre d'étude à l'échelle d'un réseau hydrographique. Nous nous sommes penchés sur les apports pratiques de cette thèse pour les gestionnaires avant de définir de nouveaux axes scientifiques qui pourront être prochainement explorés.

Mots-clés : bassin du Rhône, Directive Cadre Européenne sur l'Eau, géomatique, photographies aériennes, réseau hydrographique.

Contribution of geomatics for multiscale physical characterization of river systems

Development of indicators applied to the Rhone basin.

ABSTRACT

According to the Water Framework Directive (WFD), the good ecological status of all aquatic environments should be achieved by 2015. This status is evaluated largely using biological parameters, themselves controlled by the physico-chemical and hydromorphological conditions of water bodies (Partie 1.Chapitre 1.B). To achieve the objectives of the WFD, an assessment of the physical condition of the hydrographic network appears as an essential phase, yet this issue still requires research of a fundamental nature. The implementation of this phase in the basin of the Rhone generates a number of scientific questions which it is necessary to answer before considering practical application. In fact, knowledge of geomorphology and hydrology is now sufficient at local scale and we can envisage applying this information at a regional scale (Partie 1.Chapitre 1.B). However, the change of scale is the origin of important methodological constraints linked in particular to the great heterogeneity of environments (Partie 1.Chapitre 1.B). This thesis has two objectives. On the hand, **the implementation of geomatic tools to obtain an overall and homogeneous characterisation of the physical network** (Partie 2). We propose to develop a methodology to extract information. On the other hand, these tools and methodology will be tested and applied to the Rhône River system to evaluate their effectiveness and to **provide reliable evidence for the characterization of large-scale physical conditions** (Partie 3 et Partie 4).

Firstly, we worked **at the fluvial reach scale** (Partie 3). We tested our method on two areas: the Drôme river corridor (a hundred kilometers long) using vector and raster data (Partie 3.Chapitre 1), then on the larger area of the Rhone river system as a whole (Strahler greater than 2; approximately thousands of km) using only vector data (Partie 3.Chapitre 2). In these two cases, we segmented the river into geomorphological homogeneous reaches.

In the first case, we segmented the river with regards to active channel and valley bottom widths. For the entire network Rhone, we added a parameter "confluence". We then extracted several metrics per homogeneous reach in order to realize a statistical analysis **and so develop a typology of fluvial styles**. We obtained 5 classes for the Drôme River and 18 types for the Rhone hydrographic network. We used these spatial units to extract metrics and develop indicators of the physical conditions of the rivers. For example, we developed a procedure **to localize sites that could potentially be qualified as exceptional** in terms of natural heritage,

such as gorges or sites with a high ecological potential based on two indicators (fluvial style and ecotones). At the scale of the hydrographic network of Rhone River, we extracted metrics feeding into a database. This database allows us **to perform queries to identify areas of high heritage value or identify areas with high lateral-mobility potential.**

Finally, we tested our method to extract indicators at the finer scale of **facies** (Partie 4). We worked from orthophotos from IGN on the downstream part of the Drôme. We developed **a mapping of meso-habitat** based on intra-channels polygons. These spatial units are the most suitable to extract facies from the image. This map allows us to draw up a list of indicators giving the possibility to make a quantitative analysis of aquatic landscapes for the studied linear. Using the previously defined typology, we have performed this analysis by fluvial type. Moreover, in the last chapter, we tested **opportunities for studying aquatic habitats using indicators extracted longitudinally.**

A general conclusion (Partie 5) reviews the methodological contributions of this work and focus on the strong interest of using GIS to characterize river systems. We define new areas of scientific investigation, and identify the potential practical applications of the findings of this thesis for river managers.

Keywords: aerial photographs, geomatic, hydrographic network, Rhone basin, Water Framework Directive.



Préambule

A. Contexte de recherche

B. Cadre géographique et sources de données

A. Contexte de recherche

Atteindre le bon état écologique des masses d'eau dans le bassin du Rhône d'ici 2015 comme l'exige la Directive Cadre européenne sur l'Eau nécessite d'effectuer un audit de la qualité physique du réseau hydrographique. Si les protocoles d'acquisition des connaissances et de diagnostic sont aujourd'hui bien établis à l'échelle locale (tronçons de quelques kilomètres), leur application à l'échelle du réseau hydrographique nécessite de nombreuses adaptations. Les enjeux sont importants puisqu'il s'agit de mettre en place des techniques de caractérisation physique des cours d'eau à large échelle, en exploitant au mieux les informations disponibles, sachant qu'il est nécessaire de disposer de données qui soient les plus homogènes possible sur l'ensemble du bassin versant. Les progrès techniques qui ont été faits ces dernières années dans le domaine de la télédétection laissent entrevoir des perspectives intéressantes pour une caractérisation physique du réseau hydrographique à l'échelle de grands bassins versants.

Le travail exposé ici s'inscrit dans cette perspective. Notre objectif est de présenter une démarche permettant **de développer les connaissances sur l'état biophysique des milieux aquatiques à l'échelle des réseaux hydrographiques** en apportant **des outils concrets et applicables dès à présent sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée et Corse**.

S'insérant dans une démarche pluriannuelle (entre 2007 et 2010), quatre études financées par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse et la Zone Atelier Bassin du Rhône, ayant chacune fait l'objet d'un rapport, sont à l'origine même de cette thèse. Ces différents travaux ont été conduits afin de développer des outils d'état des lieux du réseau hydrographique du bassin rhodanien dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE sur l'eau. La première étude a porté sur une *recherche bibliographique concernant l'utilisation de l'imagerie pour la caractérisation des milieux aquatiques*. En 2008, à partir d'une série de tests sur le bassin de la Drôme, nous avons mis en place un *protocole d'extraction d'indicateurs de caractérisation physique des milieux aquatiques en utilisant la BD Ortho[®] de l'IGN*. En 2009, les tests ont été poursuivis en focalisant la recherche sur (1) l'objet « eau », en abordant la *caractérisation des habitats piscicoles* et sur (2) la *détermination automatique des styles fluviaux*. Puis la dernière étude réalisée, en 2010, a reposé sur l'utilisation d'outils géomatiques appliqués à des *données vectorisées afin de caractériser les pressions anthropiques sur l'hydromorphologie sur l'ensemble du bassin rhodanien*. Cette thèse a été également financée grâce à un poste d'ATER d'un an à l'ENS de Lyon (2011 / 2010).

B. Organisation générale du manuscrit

Cette thèse est composée de cinq parties.

- ✓ La *première partie* repose sur de nombreuses lectures scientifiques pour répondre aux questions sur la **caractérisation à large échelle d'un réseau hydrographique via les outils géomatiques**. Elle propose également une présentation du **site d'étude, le bassin Rhône Méditerranée Corse**, sur lequel sont appliqués les différents tests techniques.
- ✓ La méthode générale suivie tout au long de cette thèse est mise en place dans la *seconde partie*. Elle présente la procédure qui à partir de **données numériques** permet d'extraire des **objets** sur lesquels des **métriques** sont évaluées par **unité spatiale** afin d'élaborer des **indicateurs**.
- ✓ Les résultats obtenus à partir de cette méthode sont présentés dans les *troisième et quatrième parties*.
 - Nous avons identifié des tronçons géomorphologiques homogènes avant de mettre en place une typologie fluviale permettant :
 - de définir des sites potentiellement intéressants en termes patrimoniaux, voire esthétiques pouvant être considérés comme des géomorphosites ;
 - de localiser des tronçons « en tresses » présentant une forte diversité potentielle d'habitats ou d'appliquer des modèles d'érosion latérale potentielle.
 - La *quatrième partie* reprend une méthode d'identification des méso-habitats servant à l'étude du paysage aquatique.
- ✓ La *cinquième partie* présente le bilan de cette thèse.



Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude

A. Cadre scientifique

1. Cadre thématique : caractérisation physique des cours d'eau à large échelle
2. Cadre méthodologique : apports de la géomatique et outils d'analyses
3. Problématique de recherche

B. Cadre géographique et sources de données

1. Cadre géographique
2. Sources de données utilisées

La littérature scientifique constituant le socle de notre réflexion, porte sur la caractérisation physique des réseaux hydrographiques à large échelle via l'utilisation d'outils géomatiques.

La première section illustre le contexte scientifique de cette recherche. Dans un premier temps, est exposé un état de l'art portant sur la caractérisation physique des cours d'eau en présentant leur organisation spatiale. Il est suivi d'un inventaire des différentes techniques permettant d'appréhender cette caractérisation à large échelle. Puis est abordée la question de l'évaluation des cours d'eau, selon les exigences de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau notamment. Enfin dans un dernier point, nous soulignons l'intérêt des outils géomatiques dans le cadre d'un état des lieux des corridors fluviaux à large échelle.

La seconde section expose le cadre géographique de ce travail, en présentant le bassin versant du Rhône et également le bassin Rhône Méditerranée Corse administré par l'Agence de l'Eau RMC porteuse de ce projet. Sont aussi indiquées les sources de données utilisées dans cette thèse.

A. Cadre scientifique

1. Cadre thématique : caractérisation physique des cours d'eau à large échelle

Les rivières ont des formes ou des largeurs différentes, un dynamisme et des paysages distincts les unes des autres, voire d'un segment de rivière à l'autre (Partie 1.A.1.1). Autant de raisons qui conduisent à dire qu'il n'existe pas un « modèle type » de rivière mais une multitude. Depuis longtemps les hommes cherchent à classer les cours d'eau dans le but d'en comprendre le fonctionnement ou d'analyser l'impact des interventions humaines (Partie 1.A.1.3). Quel que soit le type d'action anthropique mise en œuvre, elle influencera forcément son lit et ses marges aussi bien au niveau écologique, que hydromorphologique, voire physico-chimique (Partie 1.A.1.2).

1.1. Structure et organisation spatiale des cours d'eau

Pour permettre l'évaluation de l'état physique d'un réseau hydrographique et de son bassin versant, il faut en comprendre le fonctionnement. L'approche systémique repose sur deux grands concepts complémentaires. D'une part, le **système fluvial** (Figure 1.1.A) permet d'appréhender les relations entre le cours d'eau et son bassin versant et d'autre part, l'**hydrosystème fluvial** (Figure 1.1.B) se concentre sur les échanges entre le cours d'eau et sa plaine alluviale (Amoros and Petts, 1993).

1.1.1. Définition du système fluvial et de l'hydrosystème fluvial

Classiquement le cours d'eau est représenté de façon linéaire. Les flux, qu'ils soient liquides ou solides, s'écoulent de l'amont vers l'aval. Le cours d'eau en tête de bassin se caractérise par de fortes pentes qui diminuent vers l'aval tout comme la vitesse du courant et la granulométrie. Dans le même temps ce sont les débits, les profondeurs et les largeurs du cours d'eau et de sa plaine alluviale qui augmentent (Amoros et Petts, 1993). C'est naturellement cette approche qui est d'abord adoptée par les géomorphologues et ce, dès 1964 par Leopold et al. (1964) (*in* Cohen 1998).

Le concept du système fluvial vient après (Schumm, 1977). Il se compose d'un *bassin versant* et de son *réseau hydrographique*. Il s'agit d'organiser le cours d'eau de l'amont vers l'aval en zones selon des transferts longitudinaux d'eau et de matériaux. Ce découpage se résume en trois zones : à l'amont une *zone de production*, suivie par une *zone de transfert* et enfin à l'aval une *zone de stockage de sédiments* (Figure 1.1.A). Le principe du système fluvial repose sur des systèmes ouverts à processus-réponses, qui se basent sur des variables agissant à différentes échelles (topographie, géologie, climat, végétation ...). Les limites de ces systèmes ouverts sont principalement celles du bassin versant, du thalweg ainsi que celles des flux entrants de matières liquides et solides

(Bravard et Petit, 1997). Les flux liquides et solides représentent les variables dites de contrôle (ou variables externes). La variation des débits liquides et solides est à l'origine d'un ajustement des variables géométriques (Bravard et Petit, 1997), décrivant la morphométrie du lit : pente, largeur, profondeur ou sinuosité du lit. Ces dernières constituent les variables d'ajustement (ou variables internes). Selon Knighton (1984) (Équation 1.1), le changement positif ou négatif des conditions de débits (liquide ou solide) aura des conséquences sur la largeur, la profondeur, la pente du chenal ainsi que sur sa sinuosité. Ce sont ces changements qui définissent le style fluvial.

Équation 1.1. Équations représentant l'influence des variables externes sur la morphologie du chenal (Knighton, 1984).

$$\begin{aligned}
 Q_l^+ \text{ et } Q_{sf}^+ &= w^+, d^\pm, (w/d)^+, \lambda^+, S^\pm, I_s^-, \\
 Q_l^- \text{ et } Q_{sf}^- &= w^-, d^\pm, (w/d)^-, \lambda^-, S^\pm, I_s^+, \\
 Q_l^+ \text{ et } Q_{sf}^- &= w^\pm, d^+, (w/d)^\pm, \lambda^\pm, S^-, I_s^+, \\
 Q_l^- \text{ et } Q_{sf}^+ &= w^\pm, d^-, (w/d)^\pm, \lambda^\pm, S^+, I_s^-,
 \end{aligned}$$

Avec Q_l : le débit liquide, Q_{sf} : le débit solide, w : la largeur du chenal, d : la profondeur du chenal, λ : la longueur d'onde des méandres, S : la pente du chenal, I_s : la sinuosité du chenal.

Le principe d'équilibre dynamique décrit que même après une perturbation, les systèmes retrouvent un état proche de l'initial. Cela s'explique par le fait que les entrées de flux sont égales aux sorties (Bravard et Petit, 1997). Par conséquent, il y a un ajustement permanent autour d'un état d'équilibre dynamique. On parle de résilience pour définir la capacité du système à retrouver son état initial. La métamorphose fluviale intervient lorsqu'un nouvel état d'équilibre se forme après une transformation du style fluvial, due aux modifications des variables de contrôles. Pour Lane (1955), le principe de dynamique fluviale repose sur une recherche constante d'équilibre entre la charge solide (Q_s) et la charge liquide (Q_l).

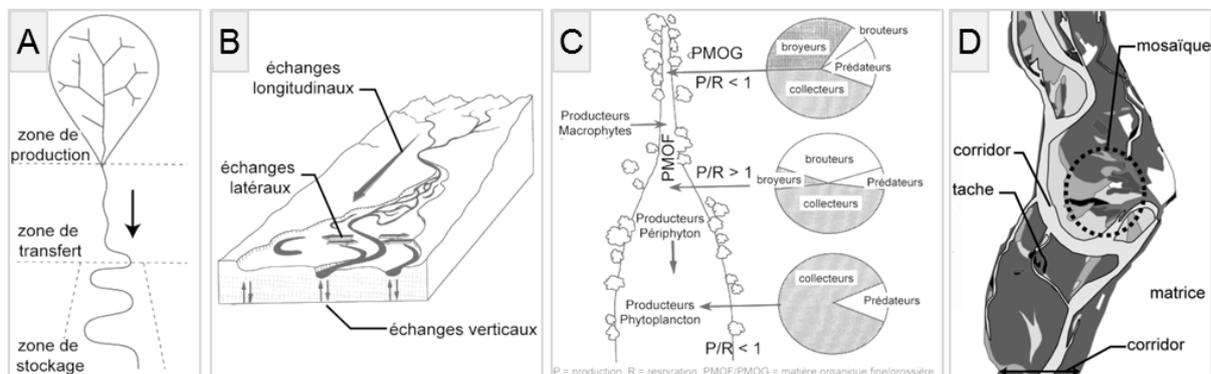


Figure 1.1. Concepts clés dans l'étude de plaines alluviales (modifiés d'après (Amoros et Petts, 1993 ; Schumm, 1977 ; Vannote et al., 1980) in (Dufour, 2005)).

A : système fluvial – B : hydrosystème fluvial – C : concept de continuum fluvial – D : mosaïque d'écosystèmes.

Le **concept de *continuum fluvial*** (Vannote et al., 1980) souligne que la répartition des communautés biologiques (poissons, invertébrés ...) s'explique par un gradient de l'amont vers l'aval des structures géologiques, physiques et biotiques (Figure 1.1.C). Vannote et al. (1980) (Figure 1.2) a théorisé un concept déjà utilisé par de nombreux auteurs. Son étude est basée sur des cours d'eau n'ayant pas été impactés par l'homme (régions boisées du nord-ouest des États-

Unis). Il ne s'agit pas d'étudier la rivière isolément, mais en fonction des échanges de matières qu'elle peut avoir avec son bassin versant (Dajoz, 1996).

Nombreux sont les auteurs (Tableau 1.1) qui ont décrit les cours d'eau selon des paramètres écologiques de la source à l'embouchure (Dajoz, 1996). Fritsch (1872) (*in* Malavoi et Bravard 2010) identifie des zones piscicoles en fonction des caractères physiques de la rivière. Statzner et Higler (1986) et Vannote et al. (1980) basent leurs recherches sur les invertébrés benthiques. Roché (1986) étudie la répartition des oiseaux le long du cours d'eau. Huet (1949) (Figure 1.2) dans son texte a délimité les zones du cours d'eau en fonction de deux facteurs, la pente et la largeur du lit. Ces paramètres influencent la vitesse du courant, la température et l'oxygénation de l'eau (Dajoz, 1996).

Tableau 1.1. Exemples de zonations, selon un gradient amont /aval (liste non exhaustive) (complété d'après Wasson (1989) et Malavoi et Bravard (2010)).

Année	Communautés biologiques discriminées	Zones (répartition amont / aval)	Paramètres pris en compte dans la typologie	Références
1872	Poissons	Truite, Barbeau, Silure	N.R.	Fritsch (1872)
1925	Poissons	Sources, ruisselets de sources, régions à truites, ombre, barbeau, brème et d'eaux saumâtres	N.R.	Thienemann (1925)
1928	Poissons	Parties montagnarde des cours d'eau : tête de bassin, ruisseau à truite	N.R.	Carpenter (1982)
	Poissons	Cours d'eau de plaine : secteur à vairon, parties supérieure et inférieure, eaux saumâtres		
1949	Poissons	Truite, ombre, barbeau, brème	Pente et largeur	Huet, 1949
1963	Peuplements invertébrés	Crénon (zones et sources), Rhitron (épi-, méta-, hypo-), Potamon (épi-, méta-, hypo-)	Confluences principales	Illies et Botosaneanu (1963)
1973	Poissons et invertébrés	9 types (Figure 1.2)	Température, dureté de l'eau, section mouillée à l'étiage, pente et largeur du cours d'eau.	Verneaux (1973)
1980	Invertébrés aquatiques	Broyeurs, collecteurs, brouteurs, prédateurs	Réduction de la pente et de la taille des particules du substrat et augmentation de la matière organique et de la température de l'eau	Vannote et al. (1980)
1982	Végétation aquatique	Périphyton, macrophytes, phytoplancton	Réduction de la pente et de la taille des particules du substrat et augmentation de la matière organique et de la température de l'eau	
1986	Oiseaux	Cinde, guignette, sterne, foulque	N.R.	Roché (1986)
1986	Invertébrés benthiques	Rhéocrène, héliocrène, limnocrène	Conditions hydrauliques et grandes confluences	Statzner et Higler (1986)

N.R. : Non renseigné

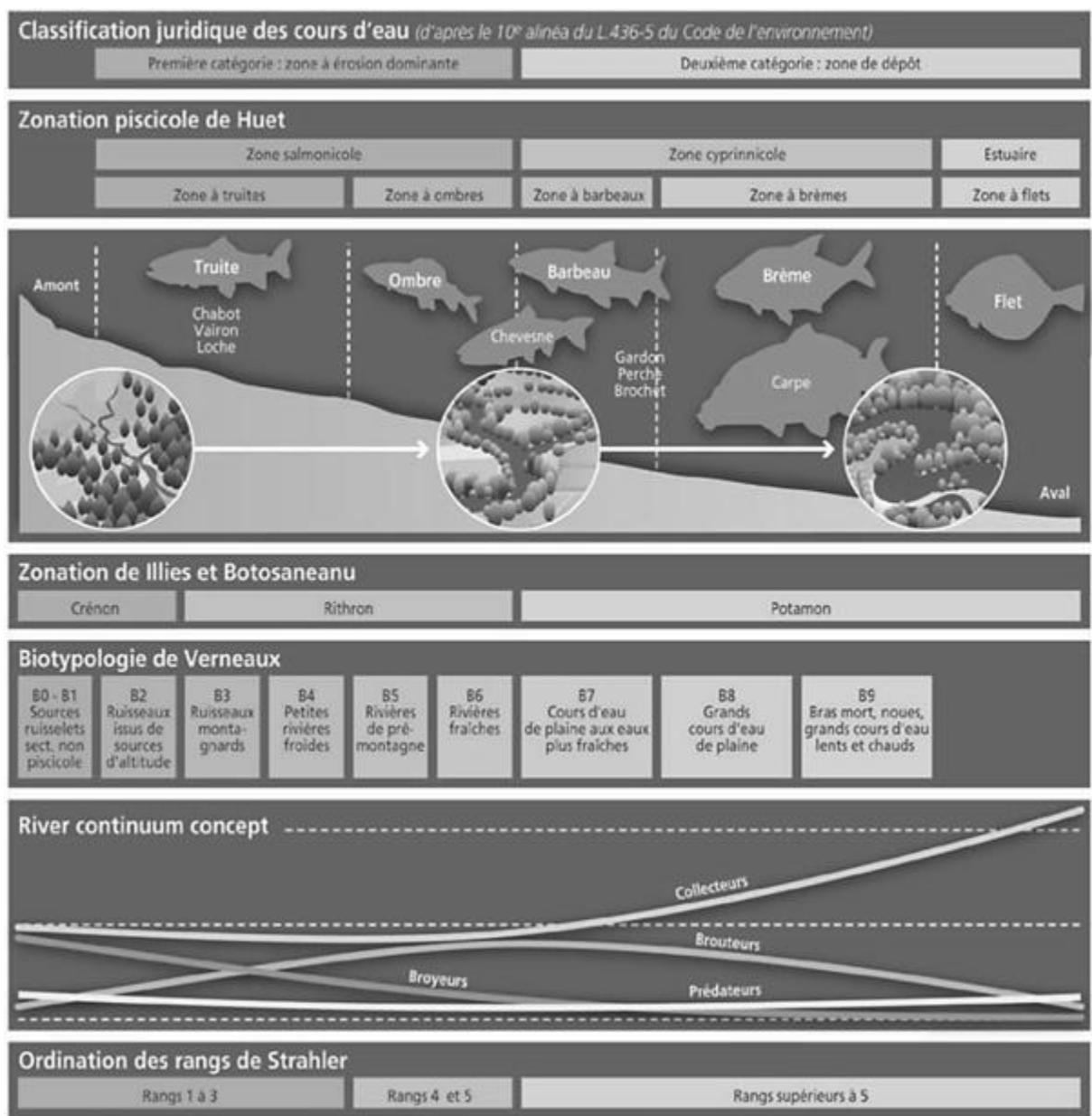


Figure 1.2. Mise en correspondance des zonations écologiques et typologiques des cours d'eau (Collectif ONEMA, 2010).

Le régime des crues a un impact fort sur les écosystèmes aquatiques et humides. La remobilisation et la redistribution des flux liquides et solides en période de crues ont une influence sur la mosaïque des habitats (*in* Grivel (2008)). C'est ce que l'on souligne sous le **concept du système pulsé** « *Flood pulse concept* » (Junk et Wantzen, 2004 ; Junk et al., 1989). Le régime des crues est comparé à un battement (Dufour, 2005 ; Kreis, 2004) : le cours d'eau peut avoir un niveau d'eau élevé en période de crue puis être suivi par une période de décrue, ce qui joue un rôle sur la dimension transversale du cours d'eau. Tockner et al. (2000) ont amélioré ce concept en y ajoutant de nouveaux paramètres, comme la température et la topographie et en l'adaptant à une zone tempérée (rivière Tagliamento en Italie).

Le cours d'eau n'est plus vu comme un simple linéaire, dont les flux s'écoulent de l'amont vers l'aval, mais comme une **mosaïque d'écosystèmes** (Figure 1.1.D). Le paysage ainsi formé est composé de plusieurs éléments ou taches (*patches*) selon les termes de *l'écologie du paysage* (Burel et

Baudry, 1999), comme les bras secondaires, les bras morts, les marais ou les forêts alluviales. La plaine alluviale se définit alors comme un écosystème (Blandin et Lamotte, 1985). Les éléments composant cette mosaïque forment un système appelé hydrosystème fluvial (Amoros et Petts, 1993 ; Amoros et al., 1987 ; Bravard et al., 1986 ; Roux, 1982). Ce système est régi par des échanges multidirectionnels de matières (Ward, 1989, 1998). Ces échanges doivent être bidirectionnels, se dérouler dans un espace à quatre dimensions et, avoir comme vecteur principal, l'eau (Dufour, 2005).

1.1.2. Concept d'hydrosystème fluvial

a) Système à quatre dimensions

L'hydrosystème fluvial (Figure 1.1.B) se décompose en quatre dimensions : trois sont relatives à l'espace et une au temps.

- ✓ La dimension **longitudinale** régit des flux unidirectionnels d'amont en aval (Amoros et Petts, 1993). Tout ce qui se déroule en amont aura une influence sur l'aval. L'évolution des caractéristiques hydrauliques, géomorphologiques et écologiques suit cet axe.
- ✓ La dimension **transversale** se traduit par des flux bidirectionnels entre la plaine alluviale, les annexes fluviales, le bassin versant et le cours d'eau. Les eaux courantes sont alimentées en matière organique par les zones riveraines.
- ✓ La dimension **verticale** se résume en une superposition d'écosystèmes superficiels et souterrains. Les échanges entre les nappes souterraines et les eaux superficielles permettent un maintien du débit en période d'étiage et une recharge des nappes en période de crue. La zone hyporhéique constitue la zone d'échange entre les nappes souterraines et le lit du cours d'eau.
- ✓ La dimension **temporelle** permet d'appréhender aussi bien les cycles saisonniers que les événements rares mais aussi les héritages des changements climatiques et tectoniques qui ont une influence sur le plan écologique ou géomorphologique. Les actions anthropiques (aménagement, prélèvements de granulats, ...) jouent également un rôle sur la géométrie du lit et par conséquent sur la diversité floristique et faunistique.

On appelle *corridor fluvial* la bande de végétation naturelle située le long d'un cours d'eau (Forman et Gordon, 1986). Elle correspond à la berge, à la plaine d'inondation et à une partie des terrasses alluviales. Comme le souligne Dufour (2005), selon l'échelle considérée, l'apparence de cette unité paysagère diffère. En effet, à l'échelle régionale, le corridor apparaîtra comme une structure homogène alors qu'à l'échelle de la plaine, il constitue une zone de transition entre les systèmes aquatiques et les systèmes terrestres. Mais, à une échelle plus locale, la dynamique du cours d'eau crée des contraintes sédimentaires et hydrologiques qui ont pour conséquence une grande diversité paysagère et biologique, causée par une mosaïque de biotopes bien diversifiés.

b) Système hiérarchisé et emboîté

L'hydrosystème fluvial se caractérise par sa structure en **quatre dimensions** mais également par le fait qu'il soit **hiérarchisé et emboîté** (Allen et Starr, 1982 ; O'Neill et al., 1986), comme les systèmes écologiques. La structure emboîtée montre que les éléments d'un niveau sont contenus dans le niveau de rang supérieur. L'hydrosystème fluvial est contrôlé par une asymétrie de contrôle entre les différents niveaux hiérarchiques ce qui signifie que les variables des larges échelles constituent des contraintes sur les niveaux inférieurs (Amoros et Petts, 1993). La durée de chaque processus ainsi que sa fréquence sont étroitement liées à la taille des systèmes qu'elles affectent. Le principe est que les éléments s'emboîtent les uns dans les autres à des échelles de temps différentes. Par exemple, un épisode de crue ou des variations de débits annuels, auront un effet à court terme : ils sont considérés comme des perturbations. À moyen terme (entre 10 et 100 ans), c'est la plaine alluviale et ses habitats qui seront affectés. À l'échelle séculaire, les changements climatiques et les processus hydromorphologiques influenceront l'hydrosystème, son fonctionnement et son organisation.

La synthèse bibliographique faite par Schmitt (2001) indique que les échelles spatiales retenues pour la classification des rivières font généralement état des niveaux hiérarchisés suivants : microhabitat, faciès, tronçon, fond de vallée, réseau hydrographique et bassin versant (Tableau 1.2).

Tableau 1.2. Systèmes hiérarchisés spatio-temporels (d'après (Schmitt, 2001))

	Échelles spatiales approximatives	Échelles temporelles approximatives
Ecorégion (ou bassin versant)	10^5 à 10^6	10^5 à 10^6
Réseau hydrographique*	10^4 à 10^6	10^4 à 10^5
Fond de vallée / plaine alluviale	10^3 à 10^5	10^3 à 10^4
Tronçon de lit mineur	10^2 à 10^4	10^1 à 10^3
Faciès d'écoulement	10^0 à 10^2	10^0 à 10^1
Microhabitat	$10^{(-1)}$ à 10^0	$10^{(-1)}$ à 10^0

* Cette échelle n'est « pas prise en compte par tous les auteurs » (Schmitt, 2001).

L'état de l'art réalisé amène à conclure qu'il existe autant d'exemples de systèmes hiérarchisés et emboîtés que d'auteurs (Tableau 1.3). Mais globalement ces derniers mettent en avant trois échelles majeures et emboîtées qui ont toutes un rôle dans la diversité des structures morphologiques :

1. **L'échelle régionale du bassin.** Les différentes formes de vallées sont dues à la diversité géomorphologique du bassin combinée au type de cours d'eau (ordre de Strahler¹). Des tronçons homogènes sont définis là où des discontinuités importantes apparaissent. Au niveau de la biodiversité, on constate que plus on se situe à l'exutoire du système, plus la diversité des peuplements est importante.

¹ Rang de Strahler : « Cet indicateur rend compte synthétiquement de la taille du cours d'eau. Dans cette méthode, deux tronçons de même ordre qui se rejoignent forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un segment qui reçoit un segment d'ordre inférieur conserve le même ordre. » (Collectif ONEMA, 2010)

2. **L'échelle linéaire du tronçon.** Wasson et al. (1998) indiquent qu'à cette échelle, ce sont les facteurs naturels et anthropiques qui expliquent les variations des paramètres locaux, comme la pente, le substrat ou la végétation. La dynamique fluviale est à l'origine des unités morphologiques (agencement des faciès en séquences régulières) contenues à l'intérieur du segment caractérisé par la morphologie du lit. Ce segment est lui-même contenu par un niveau supérieur, celui du tronçon. C'est à cette échelle que les espèces accomplissent plusieurs fonctions : repos, frayage, nourrissage, refuge pour les poissons.
3. **L'échelle ponctuelle du faciès.** Il s'agit du niveau le plus fin et défini par Wasson et al. (1998) comme déterminant les « combinaisons substrat-écoulement », signifiant que les particularités physiques (granulométrie, hauteur d'eau, vitesse de courant) expliquent les différentes ambiances et les microhabitats. Ces derniers sont à l'échelle de l'individu et permettent donc de le situer. Alors qu'à un niveau supérieur, celui du faciès, l'individu réalise une fonction biologique.

Pour Wasson et al. (1998), les processus géomorphologiques sont à l'origine du façonnement aussi bien de la vallée que de celui des particules à l'échelle de l'habitat (Figure 1.3).

Tableau 1.3. Exemples de systèmes hiérarchisés et emboîtés (liste non exhaustive).

Références	Thèmes	Niveaux
Frissell et al. (1986)	Modèles d'habitat	Réseau hydrographique (10^3m) ; segment (10^2m) ; tronçon (10^1m) ; faciès (10^0m) ; microhabitat (10^{-1}m)
Blondel (1995)	Écologie générale	Continent ; région ; secteur ; biotope ; station ; point
Bayley et Li (1992)	Écologie des poissons	Migrations ; domaine vitale ; activité journalière
Wasson et al. (1998)	Sectorisation physique des cours d'eau	Région ($> 100 \text{ km}^2$) ; tronçon (10 à 100 km) ; segment (1 à 10 km) ; séquence (10 à 200 m) ; faciès (5 à 50 m)
Poff (1997)	Habitat	Bassin versant ; Vallée / tronçon ; Faciès ; Microhabitat
Malavoi et AREA (2000) <i>in</i> Malavoi et Bravard (2010)	Typologie et sectorisation de cours d'eau	Secteur (quelques milliers de fois la largeur du lit (L)) ; unité (> 1000 fois L) ; tronçon (plusieurs centaines de fois L) ; sous-tronçon (quelques centaines de fois L) ; segment (une centaine de fois L) ; faciès (quelques dizaines de fois L)
Thorp et al. (2008) modifié d'après Petts et Amoros (1996)	Écosystème de rivière	Bassin versant, zone de processus fonctionnel, tronçon, ensemble fonctionnel, méso-habitat

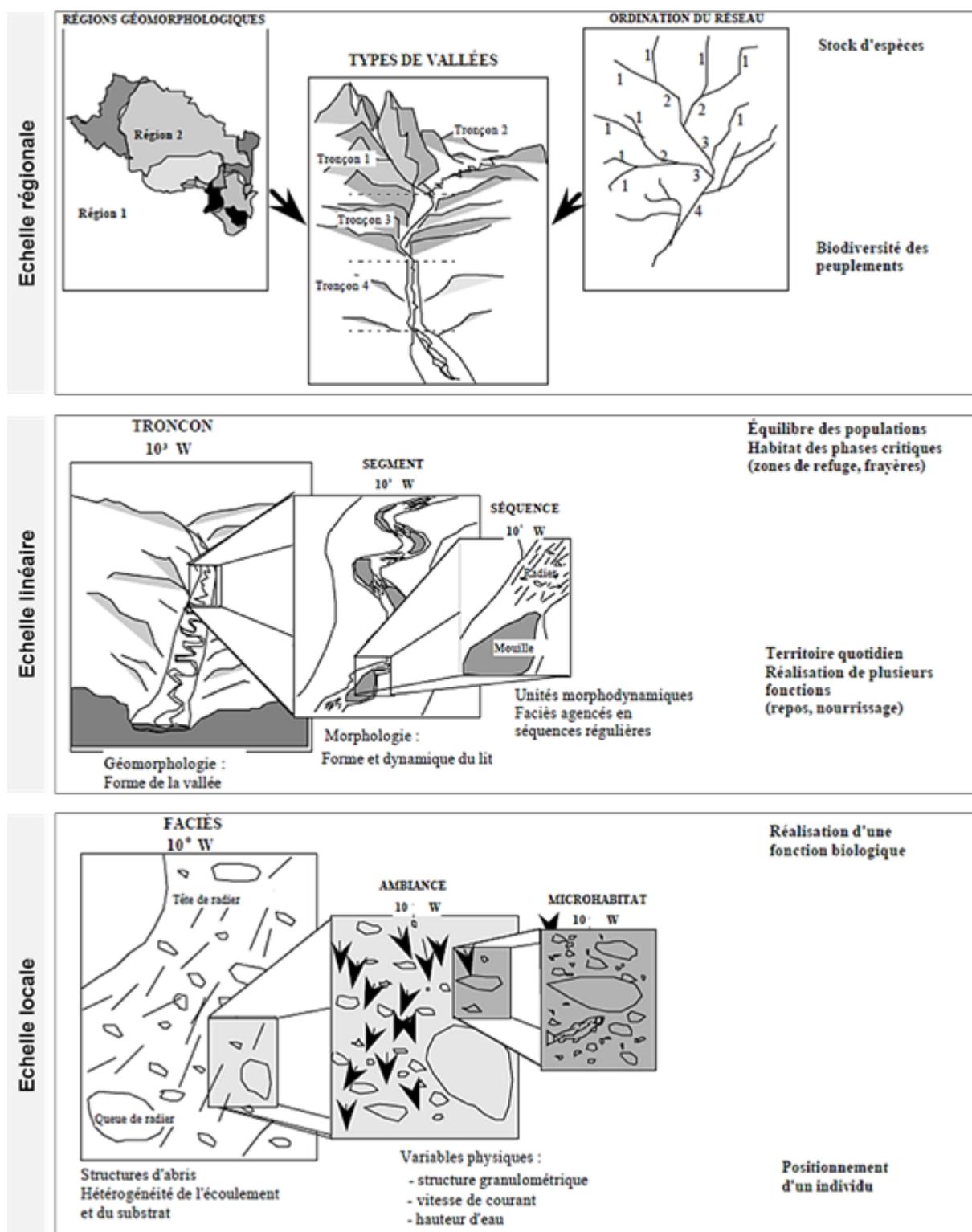


Figure 1.3. Habitat et morphologie : des échelles emboîtées (Wasson et al., 1998).

1.2. Évaluation de la qualité physique d'un cours d'eau

1.2.1. Comment définir l'état physique d'un cours d'eau ?

L'état biologique d'un cours d'eau est corrélé à son bon fonctionnement hydromorphologique. Les paramètres caractérisant l'état hydromorphologique expliquent la diversité et la qualité des habitats nécessaires aux espèces (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2009).

a) Qu'entend-on par hydromorphologie d'un cours d'eau ?

L'**hydromorphologie fluviale** regroupe à la fois l'étude des *processus physiques* qui sont à l'origine du façonnement des rivières et, celle des *formes* qui en résultent (Malavoi et Bravard, 2010). On entend par **processus physiques** l'ensemble des éléments propres à la dynamique fluviale (Malavoi et Bravard, 2010). Le transport de l'eau à l'origine du déplacement de la charge alluviale n'aura pas les mêmes conséquences sur la forme du lit selon la nature granulométrique, la déclivité ou même le type de berges. Le régime hydrologique a donc une influence sur ce transport. Pour mieux comprendre reprenons le principe d'équilibre dynamique de Lane (1955). La « *balance de Lane* » (Figure 1.4) montre qu'il existe un équilibre entre les charges sédimentaires (débit et granulométrie) et liquide (Malavoi et Bravard, 2010). Si cet équilibre est rompu, des changements morphologiques interviennent. Lorsque la charge sédimentaire en entrée est inférieure à celle en sortie, cela signifie que la rivière a disposé d'assez d'énergie pour évacuer les sédiments. Dans ce cas, le lit s'incisera et les berges pourront parfois s'éroder. Dans le cas contraire, on sera en face d'un phénomène d'exhaussement de la rivière.

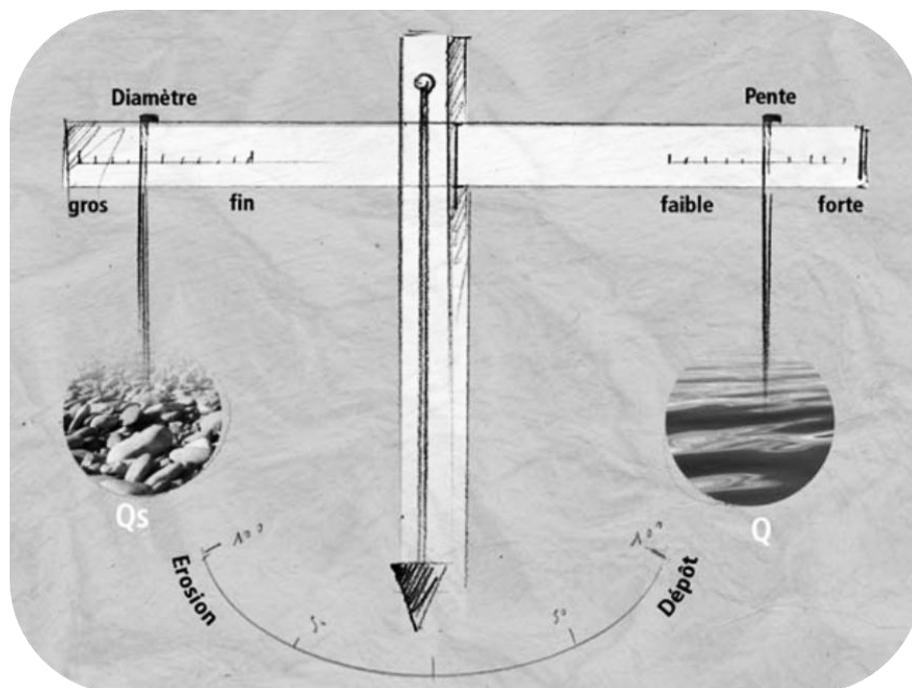


Figure 1.4. La « balance de Lane » et le principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane (1955) in Malavoi et Bravard (2010)).

Pour voir apparaître des changements morphologiques, il faut que la rivière soit en mouvement, autrement dit, il est nécessaire qu'elle connaisse des conditions hydrologiques extrêmes (crues,

étiages ...) avec un transport sédimentaire. Ce sont donc les processus physiques qui impactent différentes variables de réponses entraînant un changement de forme. Les modifications de la rivière peuvent apparaître à plusieurs niveaux (Malavoi et Bravard, 2010), selon :

- ✓ son profil longitudinal, autrement dit sa pente,
- ✓ son profil transversal en modifiant la largeur et la profondeur du lit à pleins bords,
- ✓ son style fluvial.

b) Qu'est-ce que le bon état hydromorphologique ?

Pour définir le bon état hydromorphologique, nous nous sommes basés sur des propos d'expert (Malavoi 2009). Les critères proposés sont avant tout liés au style fluvial. Selon Malavoi (2009), le bon fonctionnement hydromorphologique doit répondre à six critères d'évaluation.

1. une alternance de faciès (seuil, mouille ...) et une diversité granulométrique,
2. des berges non contraintes abritant donc une biodiversité importante,
3. une ripisylve diversifiée et importante,
4. un corridor fluvial boisé,
5. la présence d'annexes hydrauliques,
6. la présence de bancs alluviaux mobiles permettant le transport sédimentaire.

L'absence même d'un seul de ces facteurs a une influence directe et négative sur la qualité hydromorphologique. Malavoi (2009) insiste sur le fait que pour favoriser de bonnes conditions hydromorphologiques, il est important de préserver la *continuité amont / aval* du cours d'eau, mais également la *continuité latérale* et de *ne pas perturber les conditions hydrologiques*.

c) Qu'est-ce qui altère ce bon état ?

Les causes d'altération hydromorphologique, à l'origine de modifications du fonctionnement naturel d'une rivière sont nombreuses et d'origine diverses (Malavoi, 2009). En voici quelques-unes :

- ✓ la *chenalisation du cours d'eau*, dont les objectifs sont divers (réduction des crues, gain de terres agricoles, protection des berges), peut entraîner une uniformisation des milieux aquatiques (réduction de la diversité des faciès), une modification des vitesses ou de la hauteur d'eau, un changement granulométrique conduisant à une réduction de la diversité des espèces aquatiques et terrestres, une déconnexion avec les annexes hydrauliques ;
- ✓ la *disparition progressive de la ripisylve*. Celle-ci influence la trophie du cours d'eau et les habitats, du fait de son influence sur la morphologie de la berge et de la canopée qui couvre le miroir ;
- ✓ les *barrages*, qui font obstacle aux transits sédimentaires et qui ont notamment pour conséquence des changements de tracé et une discontinuité écologique ;
- ✓ l'*extraction de granulats* dans le lit mineur, qui est à l'origine d'une incision, peut engendrer un effondrement des berges et surtout une simplification des habitats aquatiques notamment lorsque la roche en place est mise à nu.

On peut également citer parmi les sources d'altérations hydromorphologiques : l'imperméabilisation des sols, l'irrigation, ou même le curage.

1.2.2. Au sens de la Directive Cadre Européenne sur l'eau

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (2000-60-CE) (ou DCE) (Union européenne, 2000) exige des États membres, d'analyser l'impact des activités humaines sur l'état des eaux de surface (Beaufrère et al., 2005, 2007).

a) Atteinte du bon état écologique : une obligation de résultat

Cette politique communautaire impose aux États membres d'atteindre un **bon état écologique** des eaux de surface en 2015 et ainsi de rendre plus cohérente la politique de l'eau au niveau européen. Ce bon état s'évalue à partir de la biologie qui résulte en partie des conditions physico-chimiques et hydromorphologiques des masses d'eau. La DCE, qui est présentée par certains comme un « modèle français » car reprenant plusieurs des concepts régissant la gestion de l'eau en France est bien plus ambitieuse (Wasson, 2001).

L'article 4 de cette directive (Union européenne, 2000) précise que l'atteinte de ce bon état est une obligation de résultat et non pas de moyens. Tout doit être mis en œuvre pour que les États européens parviennent à cet objectif d'ici à 2015 (Porcher, 2009 ; Roche et al., 2005 ; Wasson, 2001). La manière dont ils parviennent à ce résultat n'est pas imposée, mais une liste de mesures est mise à disposition des États membres (Wasson, 2001).

b) Bon état écologique

Le bon état au sens de la DCE combine états écologique et chimique des eaux superficielles. L'**état écologique** s'exprime en fonction de « *la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés aux eaux de surface* » (Union européenne, 2000). Quant au **bon état chimique** d'une masse d'eau, c'est celle où « *les concentrations de polluants ne dépassent pas les normes de qualité environnementale (fixées à l'annexe IX)* » (Union européenne, 2000). Le bon état correspond à un écart léger vis-à-vis d'une situation de référence, répondant à un état pas ou faiblement anthropisé. Pour les masses d'eau fortement impactées par l'homme, on tente d'atteindre un bon potentiel (Roche et al., 2005).

Selon Roche et al. (2005), pour qu'un cours d'eau soit en bon état, il faut qu'il soit dynamique et qu'il ait une capacité de résilience face aux événements extrêmes. Le dynamisme du cours d'eau est maintenu par trois processus fonctionnels :

- ✓ les processus physiques conditionnant la morphodynamique fluviale,
- ✓ les processus biogéochimiques,
- ✓ et enfin les processus écologiques.

La réversibilité du système face aux perturbations anthropiques ou naturelles montre que celui-ci fonctionne bien.

L'**état de référence**, qui varie selon le contexte naturel, n'est pas une fin en soi pour la DCE. Il s'agit d'un point de repère utilisé pour fixer les métriques de bioindication (Roche et al., 2005) et évaluer le bon état. Cet état de référence doit être établi de manière scientifique, mais la fixation de la limite de bon état relève davantage d'une vision politique. En effet, les intérêts socio-économiques doivent s'accorder aux exigences écologiques. Il n'est pas exigé d'atteindre une biodiversité maximale, ceci semblant impossible, mais de tendre vers un niveau d'impact suffisamment faible de telle sorte que les écosystèmes soient peu touchés.

Pour atteindre le bon état écologique, les États membres doivent suivre un planning précis, qui comporte deux phases :

- ✓ une première **phase de diagnostic**, qui concerne *l'ensemble des masses d'eau*. Il s'agit de faire un état des lieux. Le terme de masse d'eau est utilisé comme unité d'évaluation. Dans ce cas-là, il faut créer ou adopter des *outils opérationnels* (Roche et al., 2005). Sa mise en œuvre nécessite de répondre à deux questions (Wasson, 2001) :
 - la première concerne la *mise en place d'une typologie des milieux et de l'état de référence*,
 - la deuxième concerne *l'évaluation de l'état écologique pour y parvenir* ; en définissant quels bio-indicateurs utiliser et comment,
- ✓ la deuxième **phase** est liée à la première et a pour objectif la *planification des actions de restauration*. Selon l'état des masses d'eau, les actions entreprises sont différentes (Wasson, 2001) :
 - **protection** : un cours d'eau qualifié en très bon état devra être protégé,
 - **conservation** : si celui-ci est défini par un bon état, il faudra simplement faire en sorte que cet état soit conservé,
 - **restauration** : nécessaire pour tous les cours d'eau, dont l'état est qualifié de moyen à mauvais.

De plus, cette phase nécessite d'identifier les causes d'altérations avant de mettre en place des modèles prédictifs permettant de définir les actions de restauration (Roche et al., 2005).

c) Évaluation de l'état écologique

C'est le niveau de pression anthropique qui permet de qualifier une masse d'eau de « *référénte* ». Dans ce cas, l'intervention humaine est inexistante ou faible. La qualité écologique n'intervient pas dans le choix de cet état de référence, car il est supposé que ces conditions puissent varier (Wasson, 2001). L'évaluation de l'état écologique repose essentiellement sur les indicateurs biologiques. La priorité comme le rappelle Wasson (2001) est d'évaluer l'impact sur les peuplements. Pour l'évaluation du bon ou moyen état, il n'y a pas de critères précis dans la Directive. Elle est fonction de leur impact sur les peuplements.

État biologique : premier indicateur d'évaluation de la qualité écologique

La bioindication a été choisie pour évaluer l'état écologique des masses d'eau, car les bio-indicateurs sont établis selon le principe biocénotique : « à un milieu donné correspond une biocénose particulière résumant l'ensemble des facteurs écologiques qui conditionnent le système » (Tormos, 2010). Les perturbations anthropiques ou naturelles qui affectent un cours d'eau ont des répercussions sur les communautés vivantes présentes. L'analyse de la composition faunistique permet donc d'avoir une idée de l'état du milieu.

L'état biologique au sens de la DCE s'évalue en fonction de quatre bio-indicateurs : les phytoplanctons, les macrophytes, les invertébrés et les poissons. Ces indicateurs sont élaborés à partir de métriques qualitatives et quantitatives, comme la composition taxonomique, l'abondance de la biomasse, la diversité, les taxons sensibles et la structure d'âge. Les attributs utilisés sont sélectionnés en fonction de leur pertinence pour chaque bio-indicateur. Les métriques retenues sont celles qui sont influencées par les actions de l'homme (Tormos, 2010).

L'Indice Biologique Global Normalisé ou IBGN, défini, en 1992 et réactualisé en 2004 (Norme AFNOR NF T 90-350) (AFNOR 1992 AFNOR 2004 in Archaimbault et Dumont), est un bio-indicateur permettant l'évaluation de la qualité de l'eau et également celle de l'habitat, en fonction de la présence ou non de certains macroinvertébrés.

États physico-chimique et physique : en second plan

Si les conditions physico-chimiques d'une masse d'eau sont jugées de mauvaise qualité, celle-ci peut être déclassée. La qualité physico-chimique s'évalue selon :

- ✓ d'une part, des *paramètres généraux* qui sont *liés aux bio-indicateurs*, comme la température de l'eau, le bilan oxygène, la teneur en sel, l'état d'acidification et la concentration en nutriments.
- ✓ d'autre part, des polluants spécifiques, ou toxiques.

On évalue les paramètres physico-chimiques et hydromorphologiques seulement pour donner un état des peuplements aquatiques et par conséquent, une idée de la qualité des habitats. L'évaluation des conditions hydromorphologiques n'a pas de normes précises (Wasson, 2001). Toutefois, la DCE précise ce qui devra être évalué pour définir l'état de référence. Bien avant la mise en place de la DCE, l'état physique a fait l'objet de différentes évaluations, nécessitant la création d'une gamme d'outils (Partie 1.A.1.2.3).

d) Évaluation de l'état chimique

L'état chimique des masses d'eau doit pour être jugé comme « bon » répondre aux normes de qualité environnementale fixées par des directives CEE. Il est prévu que ces normes puissent être modifiées dans les années futures en y ajoutant de nouvelles substances jugées dangereuses. L'état chimique est facile à évaluer : soit il répond aux normes et dans ce cas, on le qualifie de bon, soit les normes ne sont pas respectées ce qui entraînent une mauvaise évaluation de la masse d'eau.

1.2.3. Outils d'évaluation de l'état physique des cours d'eau : en France et à l'étranger

a) Premiers outils mis en place en France

Dès les années 1970, la qualité de l'eau est surveillée. Mais il s'agit essentiellement d'en juger l'état physico-chimique. La **Grille de qualité de 1971** évaluait l'adhésion de l'eau aux usages et à la vie piscicole.

La *loi sur l'Eau du 3 janvier 1992* (Journal officiel, 1992) fait de l'eau un « *patrimoine commun de la Nation* ». Les ressources en eau doivent être préservées en qualité et en quantité. Pour ce faire, des outils de planification ont été mis en place : les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux, à l'échelle des grands bassins hydrographiques et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux, élaborés, si nécessaire, à une échelle plus locale. C'est à cette période qu'apparaissent les premiers outils d'évaluation de la qualité de l'eau, qui s'appuient avant tout sur les paramètres physico-chimiques.

Dès 1992, l'Agence de l'Eau Rhin Meuse (AERM) développe l'outil **QUALPHY**, dont l'objectif est d'acquérir des connaissances en hydromorphologie et de mesurer un écart de référence. Celui-ci s'évalue par rapport au fonctionnement « naturel » du cours d'eau. Des données collectées sur le terrain permettent ainsi de calculer un indice « milieu physique ». L'un des principaux freins de cette méthode est la nécessité d'obtenir des données *in situ* à l'échelle du tronçon : 15 ans ont été nécessaires pour parcourir les 8 000 km de cours d'eau du bassin (Collectif ONEMA, 2010).

C'est au début des années 1990, que les différentes Agences de l'Eau et le ministère de l'environnement et du développement durable ont débuté une réflexion sur la création d'une méthode d'évaluation différente, plus moderne que la Grille 1971.

Il en ressort l'établissement d'un programme de grande envergure : le **Système d'Évaluation de la Qualité** (Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 1996 ; Agence de l'Eau RMC, 1999), qui se décompose en trois parties :

- ✓ le SEQ Eau, évaluant la qualité physico-chimique de l'eau et la bonne acclimatation des organismes vivants,
- ✓ le SEQ Bio, qui évalue à l'aide de bio-indicateurs « l'état des biocénoses liées au milieu aquatique »,
- ✓ le SEQ Physique, dont l'objectif est de faire l'inventaire des connaissances en hydromorphologie pour, *in fine*, voir l'état d'artificialisation des berges et des lits mineur et majeur.

Le SEQ Physique, utilisé par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie évalue la qualité physique du cours d'eau par rapport à un état de référence non impacté par les facteurs anthropiques. Tout comme la méthode QUALPHY, dont il s'inspire, le SEQ Physique nécessite des temps de parcours sur le terrain bien trop longs et coûteux (Collectif ONEMA, 2010) et donc inenvisageables à l'échelle nationale.

À la fin des années 1990, la délégation régionale de Rennes du Conseil Supérieur de la Pêche a développé deux outils (**ROM** : Réseau d'Observatoire de Milieux et **REH** : Réseau d'Évaluation des Habitats) dont l'objectif fut de mesurer le degré d'altération des habitats selon les besoins piscicoles (Collectif ONEMA, 2010). Les méthodes utilisées reposent sur une expertise des connaissances de terrain (Collectif ONEMA, 2010). D'où une nouvelle fois des difficultés à appliquer ces outils à une plus grande échelle. Le bassin Loire-Bretagne est le seul à avoir des bases de données complètes concernant ces métriques.

L'outil d'Évaluation de l'Anthropisation des Cours d'Eau, **EVACE**, développé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et le bureau d'étude Géodiag, a été appliqué sur ce bassin de 18 750 km de rivières correspondant aux masses d'eau les plus importantes (Collectif ONEMA, 2010). Par rapport aux deux précédents outils, EVACE s'est affranchi de l'utilisation d'un état de référence correspondant à un même type de cours d'eau dit « naturel » que celui qui est à évaluer (Beaufrère et al., 2007). Ce choix a été fait, car la variabilité physique des cours d'eau est telle que même avec des paramètres morphologiques analogues, de faibles différences (géologiques ou climatiques) peuvent conduire à des cours d'eau aux propriétés physiques sensiblement différentes (Beaufrère et al., 2007). De plus, le manque de données de référence ne permet pas d'envisager une telle utilisation à l'échelle du bassin. La principale originalité de cet outil repose sur le fait que l'on part d'abord des pressions anthropiques, en faisant l'inventaire des Aménagements Travaux et Outils pour évaluer ensuite l'altération du milieu physique. Cet outil a été abandonné avec l'arrivée du projet SYRAH (Beaufrère et al., 2007).

Pour répondre aux obligations de la DCE, en 2004 un état des lieux des masses d'eau a été réalisé sur l'ensemble du territoire. Pour chacun des bassins hydrographiques, une des méthodes présentées ci-dessus a été utilisée. L'état des lieux de chaque bassin comprend une présentation des caractéristiques du bassin et plusieurs synthèses, l'une portant notamment sur les impacts

anthropiques sur la qualité de l'eau ainsi qu'une analyse économique reposant sur l'utilisation de l'eau, sur les zones protégées (www.eaufrance.fr).

Ces outils ont pour objectif d'évaluer la qualité physique des milieux aquatiques, mais sont spécifiques à chaque bassin. Ils s'adaptent à des besoins locaux. C'est pourquoi il n'existe pas à cette date, un état des lieux homogène au niveau national.

Le 31 décembre 2006 a été adoptée la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) (Journal officiel, 2006) qui reprend en droit national les principales orientations de la DCE :

- ✓ adopter les outils nécessaires à l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau, en 2015,
- ✓ rendre plus transparente la gestion de l'eau et permettre l'accès de l'eau à tous,
- ✓ améliorer l'organisation de la pêche en eau douce.

b) Vers une harmonisation nationale, voire européenne

Approche nationale

Nous avons vu que les outils présentés ci-dessus ne permettaient pas à l'échelle du territoire d'obtenir une base de données uniforme des caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau. Les méthodes ainsi que les données acquises pour qualifier l'état d'un cours d'eau sont différentes d'un bassin à l'autre. C'est ce qui a conduit le ministère de l'Écologie à mandater l'ONEMA et les Agences de l'Eau pour réaliser une méthode d'évaluation à l'échelle nationale.

Le Cemagref s'est vu confier la création d'un outil permettant de réaliser un état des lieux du milieu physique. C'est ainsi qu'est né le projet **SYRAH** (SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie). Il ne s'agit plus de décrire les altérations, mais de s'intéresser à leurs causes (Collectif ONEMA, 2010). Le Cemagref s'est appuyé sur le concept des échelles emboîtées. Il en ressort que l'identification d'une pression à une échelle supérieure se traduit par un risque d'altération au niveau inférieur. Il faut donc identifier les zones à risques en termes « *d'altération des processus hydromorphologiques* », qui, *in fine*, peuvent avoir un impact sur l'état écologique. Pour réaliser cet inventaire, des bases de données cartographiques ont été utilisées : BD Carthage[®], BD Topo[®], Corinne Land Cover, etc Cette démarche a permis de créer une base de données spatialisées de l'occupation et des usages des sols (Collectif ONEMA, 2010). SYRAH permet donc d'avoir une image à un instant *t* du risque d'altération. Il est prévu une réactualisation de la base de données à chaque nouvelle version des données initiales (BD Topo[®], CLC,...), ce qui est facilement envisageable grâce au développement des outils cartographiques. SYRAH est fondée sur l'utilisation de données cartographiques or, certaines altérations physiques comme le colmatage nécessitent une expertise terrain. Deux échelles d'analyse sont utilisées : celle du tronçon homogène au 1 : 25 000 et une plus globale (50 à 100 km²). Ces données sont mises à disposition de l'ensemble des acteurs de l'eau. Le protocole **AURAH-CE** (Audit Rapide de l'Hydromorphologie des cours d'eau) a été mis en place pour compléter SYRAH en termes de relevés de terrain.

Le protocole **CarHyCE** (Caractérisation de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) est le premier outil qui permet une description du cours d'eau à partir de mesures hydromorphologiques bien définies, limitant ainsi le biais observateur. Il a été mis en place par un groupe d'experts (ONEMA, Agences de l'Eau, Ministère, Cemagref, CNRS ...). Il s'agit de réaliser un certain nombre de mesures à l'échelle d'une station (géométrie du lit, débit, granulométrie, ripisylve ...) (Collectif ONEMA, 2010). Les données ont été acquises sur les 1 500 stations du *Réseau de Contrôle et de Surveillance*, disposant déjà de données piscicoles. Les données du RCS seront complétées par les stations du *Réseau de Sites de Référence*. Il s'agit de stations peu impactées par les actions anthropiques et qui seront donc utilisées comme sites de référence.

Les mesures acquises avec CarHyCE permettent d'identifier les pressions éventuelles à l'échelle du tronçon et SYRAH indique sur quelles pressions agir en termes de restauration, ce qui rend ces deux outils complémentaires.

Standardisation européenne

Il n'a pas été simple de mettre en place des outils robustes capables de fournir des données homogènes sur l'ensemble du territoire. On peut donc facilement comprendre que l'extrapolation d'un tel travail à l'échelle européenne soit encore plus délicate. La DCE aurait pu exiger l'application d'une même méthode pour l'ensemble des États membres. Mais ceci aurait nécessité un travail considérable en amont pour sortir un seul et unique outil alors que cette idée ne fait pas partie des exigences communautaires. Toutefois, ceci n'a pas empêché un groupe européen de se constituer dès 2000 pour réfléchir à la mise en place d'outils comparables d'un État à l'autre. Ces outils se sont inspirés de ceux qui sont existants et considérés comme les plus opérationnels (Collectif ONEMA, 2010 ; Ferreira et al., 2011) au Royaume-Uni (RHS – River Habitat Survey), en Allemagne (LAWA : Länderarbeitsgemeinschaft Wasser), et en France (SEQ Physique) (Tableau 1.4).

Tableau 1.4. Inventaire d'outils évaluant l'état hydromorphologique des cours d'eau en France (liste non exhaustive).

Nom de l'outil	Date	Références	Principes	Premier état des lieux de la qualité de l'eau	Paramètres	Sectorisation	Méthode	
AURAH-CE	2010	Valette et al. (2010)	Cemagref / ONEMA	Échantillonnage ciblé des pressions et des altérations non prises en charge par SYRAH	Test réalisé en 2010		Recalibrage, curage, digues, protection de berges, ouvrages en lit mineur, faciès d'écoulement, granulométrie, colmatage, incision	<i>In situ</i> . Utilisation d'un GPS avec un SIG embarqué
CARHYCE (Caractérisation de l'Hydromorphologique des Cours d'Eau)	2009	Non renseigné	ONEMA	Acquisition des données hydromorphologiques à l'échelle de la station	240 stations RCS (France) échantillonnées en 2009		géométrie du lit, pente de la ligne d'eau, faciès d'écoulement, granulométrie, colmatage, débit, substrat (minéral et végétal), nature et structure des berges et de la ripisylve	<i>In situ</i> Stations sélectionnées doivent être représentatives du tronçon décrit. 15 transects sur la station
EVACE (Évaluation de l'Anthropisation des Cours d'Eau)	2002 - 2004	Beaufrère et al. (2007)	Agence de l'eau Adour-Garonne		710 masses d'eau / 18 750 km de rivières			Cartographie de terrain descriptive
QUALPHY (QUALité PHYsique des cours d'eau)	1992 - 1996	Zumstein et Goetghebeur (1994)	Agence de l'eau Rhin-Meuse	Acquisition de connaissances sur l'hydromorphologie et mesure d'un écart de référence par rapport au fonctionnement "naturel"	Bassin Rhin Meuse / 8 000 km de rivières (1994)	40 paramètres décrivant le lit mineur, les berges et le lit majeur	Découpage en tronçons homogènes (composantes naturelles et anthropiques)	Sectorisation : analyse cartographique et bibliographique validée par une visite de terrain. Saisie informatique des paramètres puis obtention d'un indice
ROM (Réseau d'Observation des Milieux) et REH (Réseau d'Évaluation des Habitats)	Fin des années 90 - début des années 2000	Non renseigné	Délégation régionale de Rennes du Conseil Supérieur de la Pêche	Évaluation du niveau d'altération des habitats en fonction des exigences des habitats poissons	Bassin Loire - Bretagne	Description du milieu physique (32 paramètres) et altération de l'habitat (29 paramètres)		Attribution d'une note en fonction du niveau d'altération
SEQ Physique (Système d'Évaluation de la Qualité Physique)	1990	Agence de l'Eau Rhin-Meuse (1996)	Agence de l'Eau Artois-Picardie	Évaluation par référence au fonctionnement non influencé par les aménagements anthropiques	Non renseigné	Forme du cours d'eau, fonctionnement hydrodynamique (hydrologie par exemple)	Découpage en tronçons homogènes (pente, Strahler, géologie, facteurs d'anthropisation majeures)	Phase de terrain pour la collecte de données, puis saisie informatique des paramètres avant obtention d'indices et de classes de qualité

Nom de l'outil	Date	Références		Principes	Premier état des lieux de la qualité de l'eau	Paramètres	Sectorisation	Méthode
LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser)	Début des années 1990	(LAWA, 1998 in Charrier et al., 2002)	Allemagne Länder de Rhénanie-Palatinat et de Rhénanie-du-Nord-Westphalie	Méthode de cartographie et d'évaluation de la structure physique des cours d'eau. Outil d'aide à la gestion et de la prise de décision	Land de Hesse : 13000 km de cours d'eau cartographié de 1996 à 1999	6 paramètres principaux: style fluvial, profil en long, formes du lit mineur, profil transversal, formes des berges, corridor fluvial	Segmentation en tronçon	Petits et moyens cours d'eau (jusqu'à 60 m de largeur) : relevés terrain Grands cours d'eau : utilisation de bases de données déjà existantes
SYRAH (Système relationnel d'Audit Hydromorphologique)	2007	Chandesris et al., (2007, 2008)	France	Évaluation du risque à large échelle. Identification des altérations hydromorphologies (non naturelles) associées à une dégradation de l'état écologique	Échelle nationale	14 altérations hydromorphologiques ayant un impact sur le fonctionnement écologique des cours d'eau	Sectorisation en tronçons homogènes	Analyse large échelle et analyse tronçon. Valorisation de couches de données géographiques
IDRAIM (sistema IDRomorfologico di valutazione, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua)	Non renseigné	(Rinaldi et al., 2011)	Italie	Évaluation de l'hydromorphologie par un indice de qualité morphologique (IQM)	Non renseigné	Conditions physiographiques du bassin versant		Enquête de terrain et interprétation d'images de télédétection.

Liste non exhaustive pouvant être complétée par l'Indice Idro-Geomorphologico en Espagne (Ollero et al., 2011) ou par le River Habitat Survey au Royaume-Uni (Raven et al., 1997)

1.3. Différentes méthodes de classement des cours d'eau

L'évaluation de l'état hydromorphologique d'un réseau hydrographique passe par la collecte de données quantitatives ou qualitatives (largeur du lit, pente, granulométrie, type de végétation riveraine ...). L'analyse de ces paramètres peut paraître parfois bien complexe tant par la quantité d'informations disponibles que par la diversité du type de variables à étudier. C'est la raison pour laquelle on est amené à établir des *catégories*. Chaque cours d'eau ou tronçon de rivière est ainsi classé dans une catégorie. On crée des groupes dans lesquels les tronçons sont homogènes selon un ou plusieurs caractères (type de vallée, largeur de la bande active, indice de tressage ...) et hétérogènes par rapport aux autres groupes. Ce type de procédure est connu sous le nom de **classification**. Sa mise en place peut se faire selon deux méthodes : la *classification taxonomique* ou la *classification typologique* (Newson et al., 1998).

1.3.1. Classification des cours d'eau

La **classification** consiste à regrouper des objets en fonction de similitudes (Bailey, 1994). Ces groupes sont ensuite identifiés, étiquetés (Kondolf et al., 2003). La classification des variables ou des individus est réalisée à partir de mesures de similarité ou de différence (Gauch, 1982 ; Hawkins et al., 1993).

a) Approche taxonomique

La **taxonomie** consiste à attribuer à chaque individu une classe prédéterminée. Les taxonomistes distinguent (Kondolf et al., 2003) les classifications dites *naturelles*, où le regroupement se fait selon des caractéristiques naturelles et les classifications dites *spéciales* pour lesquelles les caractéristiques sont définies arbitrairement (Sneath et Sokal, 1973 in Kondolf et al., 2003). Les classifications taxonomistes nécessitent généralement la présence d'une *clé de détermination*. La procédure de mise en place passe par l'identification des paramètres discriminants et la définition de seuils.

b) Approche typologique

L'approche conceptuelle de la **typologie** repose sur « *un découpage subjectif en classes* » (Malavoi et Bravard, 2010). Les entités sont affectées à des types définis *a priori*. Tout comme les analyses multivariées discriminantes, il s'agit d'attribuer à chaque individu un type, en fonction de ses similarités avec l'individu-référent (Malavoi et Bravard, 2010).

1.3.2. Typologie : un outil de catégorisation des milieux aquatiques

Comme le soulignent J. R. Malavoi et Bravard (2010), le terme de typologie géomorphologique est celui le plus usité actuellement. L'objectif d'une **typologie** réside dans la tentative d'ordonnement d'un « *chaos apparent* » (Bryce et Clarke, 1996 in Cohen, 1998). Autrement dit, le principe est de ranger des données, de les regrouper selon des caractéristiques communes. Ces

groupes sont construits en fonction de paramètres discriminants (Schmitt, 2001). Les « *objets sont affectés en fonction de similarités, de relations qualitatives ou hiérarchiques* » (Lotspeich et Platts, 1982 ; Warren, 1979 *in* Cohen, 1998). Ainsi les types définis ont une faible variabilité intra-type et une forte hétérogénéité inter-type.

a) Mise en place d'une typologie

L'élaboration d'une typologie consiste à attribuer à chaque tronçon de cours d'eau un type (Schmitt, 2001). Il convient dans un premier temps de découper l'ensemble des cours d'eau en tronçons homogènes. On parle alors de **sectorisation**. Ce découpage doit être le plus pertinent possible et répondre à la problématique de départ. Suivant les objectifs à atteindre et les données disponibles, la méthode employée sera différente. Puis dans un deuxième temps, chaque tronçon se verra attribuer un type en fonction de ses caractéristiques physiques. À la différence des zonations vues précédemment, les types ne suivent pas un ordre d'amont en aval et ne sont pas établis selon des peuplements (*in* Schmitt 2001).

La sectorisation consiste en un découpage d'un cours d'eau en secteurs homogènes, sur l'ensemble ou partie de son linéaire, en fonction de différents critères (hydrologique, morphologique ou écologique) (*in* Schmitt 2001). Comme l'indique Malavoi et Bravard (2010), un cours d'eau présente des aspects différents entre sa source et sa confluence, notamment en termes de morphologie ou de fonctionnement. Certains auteurs (Leopold et Maddock, 1953 ; Schumm, 1977 ; Vannote et al., 1980) n'ont qu'une vision longitudinale du cours d'eau, c'est-à-dire que l'eau évolue selon un gradient amont / aval, ce qui ne permet pas d'appréhender ce type d'approche (Malavoi et Bravard, 2010 ; Schmitt, 2001). Au contraire, il faut reconnaître que le cours d'eau peut être affecté par des facteurs locaux comme des changements lithologiques, l'apparition de confluences majeures, des caractéristiques physiographiques propres au bassin versant, la végétation riveraine et les changements de styles fluviaux (Schmitt, 2001) qui, souvent sont associés aux modifications des caractéristiques locales. Généralement, la sectorisation est utilisée pour des travaux à large échelle (Corbonnois et Zumstein, 1994 ; Schmitt et al., 2000 ; Valette et al., 2008).

b) Typologie fonctionnelle : un outil de gestion

La typologie fonctionnelle prend en compte « *les processus générant les différents types de milieux* » (Wasson et al., 2004). La mise en place d'une typologie doit répondre aux besoins des opérateurs en regroupant des cours d'eau dont le fonctionnement morphologique ou écologique est le même. Pour qu'une typologie ait un intérêt pour un gestionnaire, il faut que les classes définies correspondent à des unités cohérentes en termes de gestion. En effet, la simplification du réseau hydrographique permettra au gestionnaire d'intervenir de manière similaire pour des tronçons de cours d'eau ayant des caractéristiques communes.

L'un des principaux avantages de la classification est la possibilité de comparer les cours d'eau entre eux (Malavoi et Bravard, 2010). Les objectifs d'une typologie sont divers et différents les uns

des autres en fonction des exigences de leurs auteurs, du thème, de la zone géographique, des échelles spatiales d'analyse.

c) Objectifs

La synthèse bibliographique faite par Kondolf et al. (2003) recense 17 objectifs de sectorisation ou de classification. La réalisation d'une typologie peut avoir :

- ✓ un but **descriptif** (voire prédictif), des styles fluviaux ou de la vallée (Davis, 1899 ; Germaine, 2008 ; Germaine et al., 2007). Dès la fin du 19^{ème} siècle, (Davis 1899 in Kondolf et al. 2003) décrit la géomorphologie de la vallée.
- ✓ un intérêt **opérationnel** comme la gestion de ressources biologiques. Ces typologies peuvent être appréhendées à l'échelle du tronçon homogène.
- ✓ un objectif d'identification d'un type de tronçons : ceux qui sont restaurés, à forte (ou faible) érosion.
- ✓ un objectif de classement (et de caractérisation) des rivières selon leur régime hydrologique (ou en fonction de leur processus morphodynamiques, de la dynamique du fond de vallée ou de la plaine alluviale, pouvant notamment mettre en avant la notion du système hiérarchique (Gustard, 1992).
- ✓ une finalité qui est l'**évaluation de l'état du cours d'eau** en définissant des indices de qualité, des états de références (Corbonnois et Zumstein, 1994).
- ✓ un but d'identification des habitats aquatiques (Huet, 1949 ; Malavoi, 1989).
- ✓ un objectif de **régionalisation** de la forme et de la dynamique du chenal (Rosgen, 1996).

1.3.3. Régionalisation

Les conditions orographiques, géologiques ou même climatiques en tête de bassin jouent un rôle sur le fonctionnement écologique de la rivière dans son entier (Malavoi et Bravard, 2010). S'ajoutent à ces conditions, celles qui sont propres au segment lui-même (aménagement, végétation, nature du lit ...) ce qui rend chaque secteur de cours d'eau « unique ». Bien qu'unique, le cours d'eau fait partie intégrante d'un système, l'hydrosystème fluvial. Toute pression humaine aura un impact non seulement local, là où elle s'exprime (barrage ou extraction de granulats), mais aussi bien souvent à plus long terme sur l'ensemble ou partie du cours d'eau. Il en va de même pour les caractéristiques naturelles. La gestion environnementale doit prendre en compte cette particularité pour la mise en place de quelques actions que ce soit (restauration, conservation ou protection). Un tronçon de rivière ne fonctionne pas de façon indépendante, il appartient à un système. Pour faciliter les actions de restauration par exemple, définir un cadre spatial peut s'avérer judicieux. En effet, regrouper des cours d'eau ayant des « *caractéristiques physiques et biologiques similaires à même gradient d'évolution longitudinale* » (Wasson et al. (2004) in Malavoi et Bravard (2010)), permettra d'organiser au mieux les actions environnementales. Il s'agit du concept de **régionalisation**.

a) ... une classification spatialisée particulière

La régionalisation est un type de classification spatialisée particulière (Bryce et Clarke, 1996) dans laquelle la notion d'espace est centrale. Autrement dit, régionaliser c'est attribuer un cadre spatial à une classification. La position dans l'espace influence la valeur mesurée. La création des régions (Omernik, 1987 ; Wasson et al., 1993 ; Wiken, 1986) permet de se passer des détails qui n'ont pas « *d'influence sur un grand ensemble spatial* » (Wiken 1986 *in* Andriamahefa 1999). Les régions sont donc des entités spatiales particulières et originales qui se distinguent des autres par leur spécificité (Frey, 1975).

b) ... un outil multifonctions

La régionalisation est un outil d'aide à la planification et à la gestion de l'environnement. En effet, elle nécessite de délimiter un cadre spatial pour définir des entités pertinentes, caractérisées par une multitude de paramètres. Chaque région se distingue d'une autre par au moins un paramètre.

c) Deux approches

Cohen (1998) note deux manières de régionaliser.

- ✓ L'**approche ascendante**, (ex. les régions ichtyographiques (Hawkes et al., 1986 *in* Cohen, 1998) qui se base sur une grille spatiale d'échantillonnage, construite en fonction des objectifs à atteindre. Chaque entité de l'échantillon est mesurée avant d'être répartie dans une classe. Les régions sont ensuite circonscrites en fonction de la répartition spatiale des classes.
- ✓ L'**approche descendante** (ex: les Hydroécorégions (Wasson et al. 2004) repose sur une expertise. Les régions sont délimitées en fonction des critères d'homogénéité prenant en compte les « *effets imbriqués entre échelles* » (Cohen, 1998). Pour valider ce découpage, on vérifie qu'il réponde à des questions « plus élémentaires », en prenant en compte une échelle plus précise. Il est nécessaire qu'une variable au moins permette de distinguer deux régions entre elles. Les régions peuvent ensuite être fractionnées ou fusionnées afin d'améliorer les résultats.

2. Cadre méthodologique : apports de la géomatique et outils d'analyses

L'objectif principal de ce travail de recherche est la création d'indicateurs d'état physique des masses d'eau à l'échelle des réseaux hydrographiques. Pour y parvenir, les outils géomatiques se sont imposés comme étant la meilleure solution vis-à-vis des exigences de départ. Il s'agit principalement d'optimiser le temps de travail et les conditions d'acquisition de l'information et de rendre possible l'extraction des métriques de manière continue et homogène sur l'ensemble du corridor fluvial, en particulier celui du bassin Rhône Méditerranée et Corse.

2.1. Inventaire des contraintes liées à l'élaboration d'indicateurs de l'état physique des corridors fluviaux à large échelle

Nous souhaitons mettre en place une procédure permettant d'élaborer des indicateurs évaluant l'état physique du réseau hydrographique du bassin rhodanien. Au préalable, nous devons définir les exigences méthodologiques.

(a) Il s'agit d'abord d'un travail à large échelle. L'amplitude de travail rend indispensable la prise en compte du **coût** et du **temps** d'application de la méthode pour son élaboration.

(b) La zone couverte représente des milliers de kilomètres de cours d'eau. Sa caractérisation physique nécessite de baser le travail sur des variables extraites de manière **homogène**, pour éviter que l'information ne soit biaisée par l'intervention de différents opérateurs. Les métriques doivent être extraites de manière continue et non plus seulement de façon ponctuelle comme cela a pu être fait auparavant (Schmitt et al., 2007).

(c) De plus, même si cette thèse n'a pas pour objectif la caractérisation physique d'autres bassins que celui du Rhône, pouvoir **transposer** notre démarche est un enjeu considérable. En effet, avoir la possibilité de réaliser des études interbassins à partir de métriques obtenues par la même approche serait pertinent.

(d) En dernier lieu, nous souhaitons élaborer un outil **facile d'accès et d'utilisation** pour la communauté scientifique ou pour les gestionnaires qui ont en charge l'application des législations concernant le bon état des cours d'eau et surtout qui s'apparente à une boîte à outils qui soit ainsi **évolutive**.

Pour satisfaire ces différentes demandes, *l'automatisation ou la semi-automatisation des étapes* menant à la création d'indicateurs physiques est une condition nécessaire. Grâce aux développements de ces dernières années des données informatisées et à leur mise à disposition, l'automatisation de notre démarche est envisageable.

Dans la suite de cette section, nous présentons un état de l'art des moyens et des applications de la géomatique en géomorphologie fluviale, puis nous exposons les outils statistiques utilisés.

2.2. Quels sont les apports de la géomatique pour les études des milieux fluviaux à l'échelle d'un réseau hydrographique ?

Rappelons que l'un des objectifs de ce travail est l'extraction (semi-) automatique de métriques, servant à la construction d'indicateurs de l'état physique à un instant t . L'automatisation des traitements permet un gain de temps et une acquisition des données homogènes. Ainsi ces dernières ne seront pas biaisées par la subjectivité de l'opérateur.

Pour permettre le traitement automatique de l'information, nous avons choisi d'utiliser les **outils géomatiques**. La géomatique se définit, selon le Journal officiel du 14 février 1994 (*in Paegelow 2004*), comme « *l'ensemble des techniques de traitement informatique des données géographiques* ». Les progrès faits ces dernières années au niveau des logiciels expliquent en partie ce choix.

Dans les paragraphes suivants sont présentés les différents outils utilisés dans le cadre de ce travail, comme le traitement de l'image à travers la télédétection (2.3), les sources d'informations les mieux adaptées à ce travail à large échelle (2.3.4) et le traitement de couches d'informations sous Système d'Information Géographique pour la description des cours d'eau (2.4) et nous présenterons brièvement les différents logiciels de géomatique utilisés (2.5).

2.3. La télédétection : outil de traitement de l'image

2.3.1. Bases de la télédétection

La télédétection définie dans le Journal Officiel du 11 décembre 1980 (*in Girard et Girard 2004*) est « *l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci* ». Elle permet l'obtention d'informations concernant la surface terrestre par acquisition d'images. Le procédé consiste à capter puis à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique (REM), qui est émis ou réfléchi par tout objet de la surface de la Terre. La répartition des fréquences de rayonnements électromagnétiques (Figure 1.5) des plus hautes aux plus basses fréquences est symbolisée par le spectre électromagnétique (Chaponniere, 2004). Les images sont acquises à l'aide d'un capteur, qui enregistre une énergie émise, réfléchie ou bien rétrodiffusée en fonction du domaine spectral considéré. Ensuite le capteur convertit ces rayons en une valeur numérique qui peut être enregistrée et traitée.

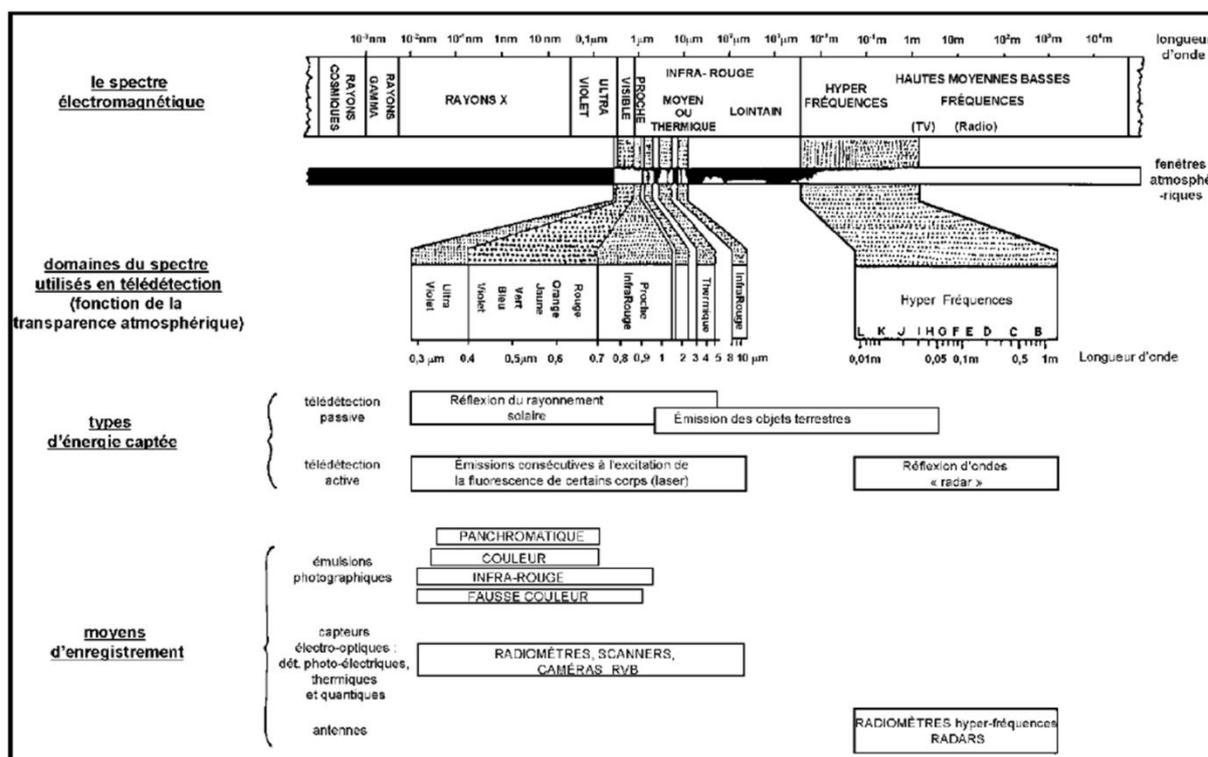


Figure 1.5. Le spectre électromagnétique et son application en télédétection (d'après (Chaponniere, 2004)).

Il existe une multitude d'appareils. On distingue les **capteurs** passifs des capteurs actifs. Les premiers renvoient à la télédétection passive et mesurent des rayonnements réfléchis ou retransmis par un objet illuminé par une source d'énergie naturelle, comme le soleil. Pour la télédétection active, les capteurs produisent leur propre énergie. Il s'agit notamment des satellites radars, comme ENVISAT ou ERS. Dans ce cas, ils mesurent un rayonnement d'origine artificielle réfléchi par une cible (Robin, 1995).

Le **vecteur** (ou plate-forme) est l'appareil qui permet la mise en place du capteur dans l'espace pour observer la cible à distance. Il peut s'agir d'un avion, d'un drone ou d'un satellite. La distinction des uns par rapport aux autres se fait en fonction de la distance les séparant du sol (Girard et Girard, 2004).

2.3.2. Quelles images choisir ?

L'**image** se définit comme la représentation d'un objet produite par la réflexion ou la réfraction de la lumière (www.rncan.gc.ca). L'éventail d'images mises à disposition des scientifiques et des gestionnaires est de plus en plus vaste. Pour sélectionner l'image la mieux adaptée à une étude en géomorphologie fluviale et plus spécifiquement à large échelle, plusieurs critères sont à prendre en considération. Comme l'indiquent les recherches de Gilvear et Bryant (2003), le choix peut se faire en fonction de la longueur et de la largeur de la rivière étudiée, de la résolution spatiale, du degré de précision requis, de la surface de la couverture au sol ou de l'eau ou de la fréquence d'acquisition nécessaire à la détection de changement.

Dans le cadre de ce travail, qui reprend une étude réalisée en 2008 (Wiederkehr et al., 2008), nous avons défini comme critères de sélection (Tableau 1.5) : les différentes résolutions des couples capteurs / vecteurs, la disponibilité des images et le coût de celles-ci en fonction de la surface couverte.

a) Résolution spatiale : quel niveau d'information explorer ?

La résolution spatiale, généralement exprimée en mètres, correspond à la taille du plus petit objet perceptible dans une image, c'est-à-dire le *pixel*. Selon Robin (1995), ce pixel est la plus petite surface homogène constitutive d'une image numérique. La notion de haute ou très haute résolution spatiale reste à ce jour relativement floue. En effet, la haute résolution des années 1990 est à présent largement dépassée. C'est pourquoi, il n'est pas toujours évident de savoir exactement à quelle résolution renvoie le terme employé dans la littérature. Selon la thématique et la taille des objets étudiés, la précision de la mesure ne sera pas la même (Desjardins, 2000 ; Robin, 1995). Cela explique l'importance de la valeur de la résolution spatiale. L'étude de l'évolution des formes fluviales peut nécessiter une précision métrique, alors que l'identification du chenal en eau en aval d'un réseau hydrographique pourra se faire à une échelle décamétrique. Mais ce paramètre n'est pas aussi simple à appréhender. En effet, cela dépend également à l'aval du réseau, de la taille de la forme fluviale et du chenal en eau (Wiederkehr et al., 2008). Un autre exemple concerne la végétation pour laquelle une faible résolution spatiale peut permettre une simple distinction entre les unités physiologiques (unités herbacées, pionnières, matures ...) (Girel, 1986) alors qu'une résolution plus fine sera nécessaire pour distinguer les espèces entre elles.

Pour connaître davantage ses besoins en termes de résolution spatiale, le théorème de Nyquist-Shannon peut s'avérer utile. Il fixe que « *le pas minimal utilisable doit être inférieur ou égal à la demi-longueur du plus petit tronçon qui participe à la formation du contour du polygone* » (Bel Hadj Ali, 2001). Autrement dit, un objet est détectable, si celui-ci a une taille minimale équivalente à celle d'un pixel. Le seuil de détection d'un objet est de quatre pixels au minimum.

Selon les objets étudiés ou les indicateurs extraits, la précision requise pour l'acquisition des données sera différente. Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons faire une analyse de la bande fluviale constituée des objets eau, bancs de galets et végétation mais également une étude intra-objet, en identifiant les différents faciès composant le chenal en eau. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir des capteurs fournissant des images à haute, très haute, voire extrêmement haute résolution spatiale, afin d'avoir des données exploitables de manière continue sur l'ensemble du réseau aussi bien pour des secteurs à chenal étroit en tête de bassin que des zones à large bande active dans les secteurs en tresses, notamment.

b) Résolution spectrale : quelles ondes radiométriques privilégier ?

L'aptitude d'un capteur à distinguer les rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes fait appel à sa résolution spectrale. Chaque objet a sa propre signature spectrale, c'est-à-dire que la partie du rayonnement solaire absorbée diffère d'un objet à l'autre. La résolution

spectrale dépend à la fois de paramètres liés au capteur, comme l'élévation solaire, l'angle de visée et les précisions spectrale et spatiale et de paramètres qui sont propres à l'objet comme la forme, la taille ou la texture.

Plusieurs types d'images peuvent être identifiés :

- ✓ les images dites **panchromatiques**, que l'on acquiert dans le domaine du visible sur un seul canal (0,4 - 0,7 μm). Les images obtenues sont alors en noir et blanc.
- ✓ les images **multispectrales** que l'on obtient à partir d'un enregistrement simultané de trois à huit bandes spectrales, qui ne sont pas nécessairement adjacentes.
- ✓ les images **hyperspectrales** obtenues à l'aide de capteurs qui peuvent enregistrer plus de 200 bandes dans la portion du visible, du proche Infrarouge (IR) et de l'IR moyen du spectre électromagnétique.

Les ondes des capteurs optiques ne sont pas absorbées par l'eau, au contraire de celles des radars. C'est pourquoi ce sont les premiers qui sont privilégiés pour réaliser une étude des milieux aquatiques.

c) Résolution temporelle : la fréquence d'acquisition des données

La résolution temporelle se définit comme étant la fréquence d'acquisition d'une image par un vecteur au-dessus d'une zone donnée. Celle-ci dépend de la largeur de la fauchée (ou de la scène). Il faut ajuster la fréquence de passage à l'objectif de l'étude, c'est-à-dire adapter la faculté du capteur à fournir des informations espacées dans le temps, pour pouvoir rendre compte d'un changement géographique (Robin, 1995). Pour envisager des études diachroniques, la fréquence de passage ainsi que l'ancienneté des données sont des paramètres intéressants à prendre en considération. En France, les photographies aériennes de l'IGN permettent de remonter jusqu'aux années 1930-1940 alors que les premières images satellites datent seulement des années 1970. Le premier satellite Landsat a été lancé le 23 juillet 1972 sous le nom d'Earth Resources Technology Satellite 1.

Pour la caractérisation de l'état physique des cours d'eau à large échelle à un instant t et sa réévaluation périodique, il est intéressant d'avoir des images dont la fréquence de capture soit régulière au moins à moyen terme, c'est-à-dire, se renouvelant au moins tous les trois à cinq ans. L'idéal serait des acquisitions saisonnières mais il faut également tenir compte du temps de traitement des données.

Tableau 1.5. Liste des capteurs et vecteurs utilisés en télédétection (liste non exhaustive)
modifiée d'après (Wiederkehr et al., 2008).

Vecteur	Fréquence de passage	Radar	Pan. ou mono.	Résolution spectrale									Résolution spatiale				
				Multispectral									EHR < 0,1 m	THR 0,1 - 5 m	HR 6 - 30 m	MR 31 - 100m	BR > 100 m
				Visible					Infrarouge								
				CB	B	V	J	R	RE	PIR	MIR	IRT					
Geoeye - 1	< à 3 jours		X	Non renseigné										X			
Drone	À la demande		X		X	X		X				X					
Hélicoptère	À la demande	N. R										X					
ULM	À la demande				X	X		X		X		X					
Avion IGN	tous les 5 ans				X	X		X					X				
Worldview 2	1 : 1,1 jours ; 2 : 3,7 jours			X	X	X	X	X	X	X			X				
Worldview	WV60 non renseigné		X										X				
Eros B	PIC-3 non renseigné		X										X				
IRS-P6 (Ressourcesat 1)	LISS3	24 jours (Pan et MX 5 à 24 jours)				X		X		X	X			X			
	LISS4			mono.		X		X		X				X			
	AWIFS				X		X		X	X				X			
Orbview 3	OHRIS 3 jours		X		X	X		X	X			X					
Spot 5	HRG 3 à 25 jours		X			X		X		X	X		X	X			
	VGT 1 fois / jour					X		X		X	X				X		
	HRS 3 à 26 jours		X										X				
Envisat	ROS 35 jours	X											X	X	X		
Quickbird 2	BHRC60 1 à 3,5 jours		X		X	X		X		X			X				
Eros A1	PIC-3 1,8 à 4 jours		X										X				
Terra	ASTER 16 jours					X		X		X	X		X	X			
Ikonos 2	OSA 3 jours à 1 m; 1,5 jours à 1,5 m		X		X	X		X		X			X				
Landsat 7	ETM + 16 jours		X		X	X		X		X	X		X	X	X		
Spot 4	HRVIR 3 à 25 jours		X			X		X		X	X			X			
	VGT 1 fois / jour					X		X		X	X				X		
Radarsat 1,2	ROS 1 : 16 jours ; 2 : 24 jours	X												X	X		
IRS-1C/1D	LISS3 24 jours (Pan 5 à 24 jours)					X		X		X	X			X			
	WIFs							X		X					X		
	Pan			X										X			
Jers-1	ROS 44 jours	X			X	X		X		X	X		X				
ERS 1, 2	ROS 35 jours	X											X				
Spot 1 à 3	HRV 3 à 26 jours		X		X	X		X		X			X				
Landsat 4, 5	MSS 16 jours					X		X		X	X			X			
	TM					X	X		X	X	X			X	X		
NOAA	AVHRR 2 fois / jour							X		X					X		
Landsat 1 à 3	MSS 16 jours					X		X		X				X			

Pan. ou mono. : Panchromatique ou monochromatique
 CB ; B ; V ; R ; RE ; PIR ; MIR ; IRT : Coastal blue; Bleu ; Vert ; Rouge ; Red edge, Proche Infrarouge ;
 Moyen Infrarouge ; Infrarouge Thermique
 EHR ; THR ; HR ; MR ; BR : Extrêmement Haute Résolution; Très Haute Résolution; Haute Résolution;
 Moyenne Résolution; Basse Résolution
 N.R : Non renseigné

d) Coût des images et qualité de l'information

Bien que la sélection d'une image se fasse essentiellement en fonction de la qualité de ses résolutions (temporelle, spectrale ou spatiale), son coût est souvent à prendre en considération pour faire un choix. Le prix de la scène dépend principalement de la surface couverte et de la résolution spatiale. Pour faciliter la comparaison entre les différents couples capteur / vecteur, le calcul du coût de l'image est effectué en fonction de la surface à couvrir. L'étude des coûts réalisée par Lejot (2008) souligne que les images satellitaires sont les plus rentables pour des acquisitions à large échelle (Figure 1.6).

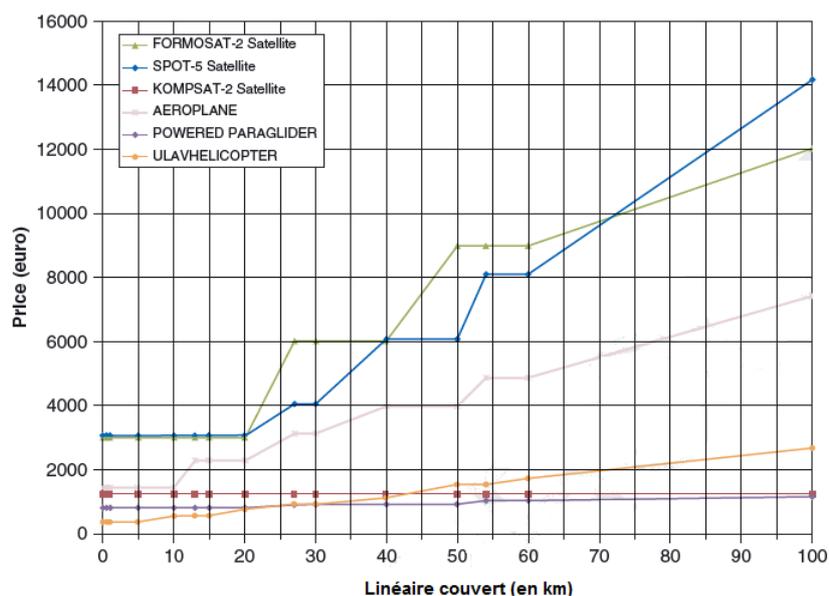


Figure 1.6. Lien entre la taille du tronçon et le coût (Carbonneau et al., 2012).

2.3.3. L'utilisation de l'image pour l'étude des systèmes fluviaux

L'utilisation des images aériennes ou satellitaires est de plus en plus fréquente pour les études en géomorphologie fluviale ou ayant pour thème les systèmes fluviaux (Tableau 1.6). Un accroissement de la bibliographie scientifique à ce sujet s'opère depuis le début des années 2000 (Figure 1.7). Il est en partie lié à une augmentation des publications dans le domaine de la géomorphologie. L'un des avantages d'utiliser des images par rapport aux données acquises sur le terrain réside en la possibilité d'automatiser les traitements mais pas seulement. De nombreux auteurs exploitent l'image par photo-interprétation. Les études réalisées à partir de l'image couvrent des domaines divers. Il y a des études diachroniques, dont l'objectif est d'observer l'évolution des formes fluviales dans le temps (Arnaud et al., 2010). Des auteurs travaillent sur la végétation (Dufour et al., 2012), d'autres sur les phénomènes d'érosion. Brasington et al. (2003) et Marcus et al. (2003) quant à eux, étudient la bathymétrie des chenaux. Bien que les études soient diverses, l'échelle de travail reste encore limitée. Nombreux sont ceux qui travaillent à l'échelle du tronçon. Mais de nouveaux travaux émergent à une échelle plus large (Kosuth et al., 2010), comme ceux de Tormos (2010), qui travaille sur plus de 1150 km de cours

d'eau (Bassin de l'Hérault) ou ceux de Lalande (En cours) sur le bassin de la Saône avec 9000 km de cours d'eau.

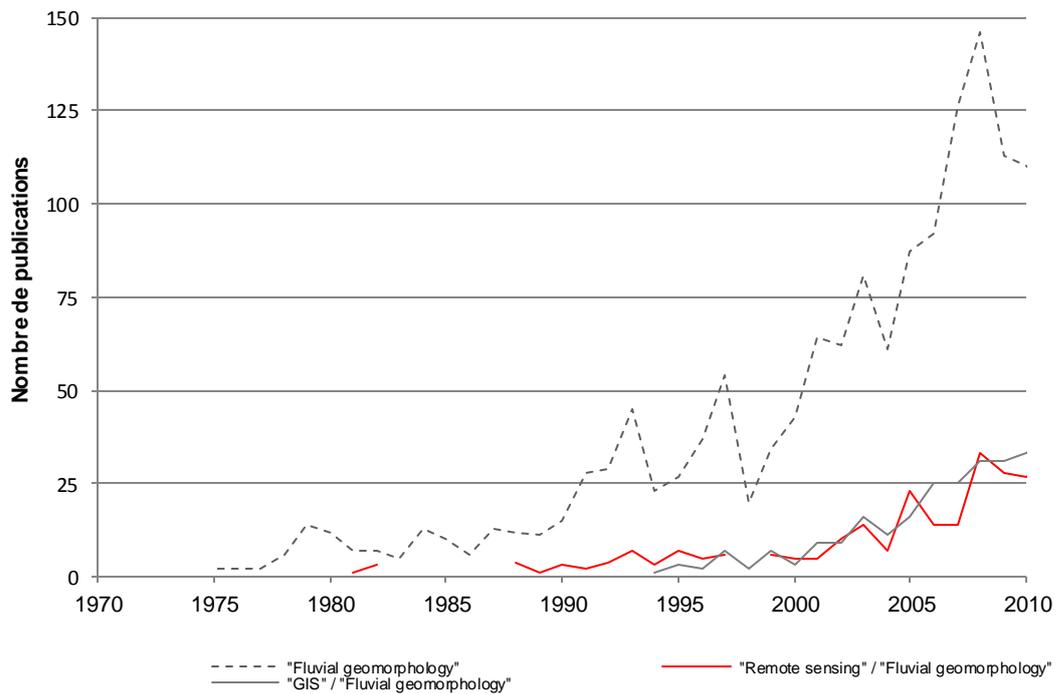


Figure 1.7. Évolution du nombre de publications scientifiques sur la période 1975 – 2010 ayant pour mots-clefs A : « Fluvial geomorphology » ; B : « Remote sensing » et « Fluvial geomorphology » et B : « GIS » et « Fluvial geomorphology » (Source : Elsevier, base non exhaustive).

Tableau 1.6. Études réalisées à partir d'images sur la thématique des systèmes fluviaux (liste non exhaustive) d'après Piégay et al. (2012).

Sites d'études	Date	Résolution	Données	Paramètres	Références
Comparaisons inter-sites					
50 sites en tresses	Actuel	50 cm	Orthophotographies nationales	Largeur, Pente	Piégay et al. (2009b)
Région du Pacifique Nord / 42 tronçons	Photos séquentielles de 1939 à 2000	1:12 000	Orthophotographies nationales	Forme du chenal et divagation	Beechie et al. (2006)
30 méandres / 119 bras morts	Actuel	Variable	Images Google	Largeur, sinuosité, longueur	Constantine et Dunne (2008)
10 à 20 méandres de plusieurs centaines de km	Actuel	Variable	Images Google	Géométrie de méandre	Zhang et al. (2008)
Étude à l'échelle du tronçon					
Ain (France) / 40 km	1945 et 1991	50 cm	Anciennes orthophotographies nationales combinées à des relevés terrain et LIDAR	Érosion, végétation	Marston et al. (1995), Rollet (2007)
Sebou (Maroc) / 12 km	1983	1:20 000	Photographies aériennes en noir et blanc (vol spécial)	Reconstitution de profils en travers d'une rivière à méandres	Igouzal et al. (2003)
Fleuve Rhône (France) / 500 km	83 dates : de 1999 à 2009	60 m	Landsat	Température de surface	Wawrzyniak et al. (2012)
Drôme (France) / 106 km	Actuel	50 cm	Anciennes orthophotographies nationales	Largeur, sinuosité, longueur	Wiederkehr et al. (2010b)
Rhin (France) / 50 km	8 dates : de 1949 à 2008	50 cm et 20 cm (orthophotographies récentes)	Survol spécial : photographies aériennes (couleur et noir et blanc)	Évolution morphologique	Arnaud et al. (2010)
Brahmaputra (Bangladesh) / 200 km	14 dates : de 1967 à 2002	10 m (1967); 80 m (1973 to 1987); 30 m (1989 to 2002)	Images panchromatiques acquise par les satellites American Corona (1967); Landsat MSS (1973 à 1987); Landsat TM (1989 à 2002)	Largeur des tresses, nombre et largeur des chenaux, distribution des sols	Takagi et al. (2007)
Brazos (Texas, USA) et Lamar (Wyoming, USA) / tronçons de 1 et 2 km	Août 1999 (Lamar) et Mai 2002 (Brazos)	1 m	Survol spécial. Brazos River : (rouge, vert, bleu) photographies aériennes et Lamar River : imagerie hyperspectrale 128 bandes	Profondeur (modèles bathymétriques)	Fonstad et Marcus (2005)
Tay et Tummel (UK) / 12,5 km	de 1971 à 1994	1:5 000 / 1:7 500 / 1:12 000 / 1:24 000	Photographies aériennes (couleur, fausse couleur infrarouge et noir et blanc)	Largeur, indice de tressage et sinuosité	Winterbottom (2000)
Étude à large échelle					
Europe	Actuel	25 m	2 mosaïques combinées : Landsat ETM+ et Spot LISS	Zone riparienne	Clerici et al. (2011)
Bassin de l'Hérault (France) / 1 150 km	Actuel	50 cm et 10 m	Orthophotographies anciennes et Spot 5 XS	Occupation des sols des corridors rivulaires	Tormos (2010)
Plaine d'inondation de la rivière Strickland (Papouée Nouvelle-Guinée) / 330 km	1972, 1990 / 1993 et 2000 / 2001	14 à 57 m	Landsat	Largeur du chenal et espace de divagation	Aalto et al. (2008)
Mékong (Chine) / 2,500 km	de 1998 à 2004	1 à 10 m	Ikonos et Spot 5	Forme du chenal	Gupta et Liew (2007)

2.3.4. Les sources d'information adaptées à une étude large échelle

Différentes sources de données numériques peuvent être utilisées pour réaliser ce type de travaux : aussi bien des données matricielles, que des données vectorisées.

a) Les données matricielles

Le mode matriciel (ou *raster*) permet la production d'images formées par un balayage de données et restituées sous la forme d'une matrice. Le plus petit élément du quadrillage ainsi formé s'appelle le pixel pour *picture element* (Béguin et Pumain, 2009). On peut distinguer deux types de données rastérisées : les données **images** obtenues à l'aide d'un capteur aéroporté (avion, drone ou satellite) et les **modèles numériques de terrain** (Figure 1.8).



Figure 1.8. Illustrations de différents types de *raster* : une orthophotographie de la BD Ortho® (A), une image Spot 5 (B) et un modèle numérique de terrain (C) (Sources : Géoportail : <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>).

Les images

Pour déterminer l'image la mieux adaptée à notre sujet, nous avons identifié le couple capteur / vecteur offrant le meilleur compromis au sein d'une liste de critères, définis en fonction des contraintes liées à la réalisation d'un travail à l'échelle du réseau hydrographique du bassin du Rhône (Partie 1.A.2.1). Les critères retenus ont été les suivants :

1. la **résolution spatiale** qui détermine les objets identifiables selon leur taille. Pour cette étude, les objets à détecter sont au minimum de taille métrique, comme c'est le cas pour les faciès géomorphologiques.
2. les **caractéristiques spectrales**, qui permettent de discriminer les différentes classes d'occupation des sols (eau, végétation, sédiments). L'accroissement du nombre de canaux suit celui du nombre de classes identifiables. On veut identifier les différentes tâches composant la bande fluviale comme l'eau, les bancs de galets et la végétation mais aussi faire une étude intra-chenal en distinguant les différents habitats aquatiques.
3. la **fréquence d'acquisition** des données : un renouvellement des images intra-annuel permet notamment une étude des variations saisonnières. Bien que ce ne soit pas l'objectif de ce travail, il est intéressant d'envisager des travaux futurs. C'est pourquoi il ne

semble pas absurde de prévoir l'étude des évolutions à moyen terme, c'est-à-dire la possibilité de réaliser des études diachroniques tous les cinq ans, par exemple.

4. **l'ancienneté de la base de données.** Ce travail se limite à un état des lieux à un instant t , mais la possibilité de réaliser une étude historique ne doit pas être exclue.

5. **l'homogénéité des données** et leur **disponibilité.** Il faut des données couvrant le territoire RMC. Les images doivent être le plus possible dépourvues d'anomalies qui feraient obstacle à la détection de certaines zones (présence de nuages, par exemple). Elles doivent également couvrir l'ensemble du secteur d'étude.

6. le **coût des images.** Comme il s'agit d'un travail à l'échelle d'un réseau hydrographique de plusieurs milliers de kilomètres, le coût d'acquisition des données doit être pris en compte, car il peut très rapidement atteindre des sommes considérables et par conséquent amener à limiter les recherches pour des raisons financières.

Une fois cette liste établie, un système de notation est mis en place. Pour chaque critère, nous avons attribué une valeur allant d'A, correspondant à des conditions « très favorable » pour une étude à large échelle des milieux aquatiques à C pour des « conditions défavorables » et nous avons fait correspondre à chacun de ces niveaux les couples capteur / vecteur correspondant (Tableau 1.8).

Un tableau récapitulatif présentant les notes obtenues pour chaque couple capteur / vecteur a été dressé (Tableau 1.9). Les images sont discriminées en fonction de leur résolution spatiale. Pour former les groupes, nous avons choisi la définition donnée par Puissant (2003). Nous obtenons quatre groupes : les images de types drone à extrêmement haute résolution, les orthophotographies de l'IGN, les données satellites optiques divisées en deux ensembles (très et extrêmement haute résolution ou haute résolution spatiale) (Tableau 1.7). Le croisement des différents facteurs soulignent l'intérêt des orthophotographies de la BD Ortho[®] de l'IGN par rapport aux autres types d'images. Elles constituent un support d'information homogène sur l'ensemble du réseau. Une acquisition des images satellites à très haute ou extrêmement haute résolution spatiale, ainsi que des images drones, serait à l'échelle du réseau, excessivement coûteuse. Les images satellites, financièrement plus abordables, ont une résolution spatiale trop limitée, ce qui entraîne un déficit d'informations pour les cours d'eau de rang de Strahler inférieur à 4.

Tableau 1.7. Définition des différents termes utilisés pour désigner la résolution spatiale des différents capteurs (d'après(Puissant, 2003))

Acronymes	Dénomination	Résolution spatiale (m)
EHR	Extrêmement Haute Résolution	< 0.1
THR	Très Haute Résolution	0.1-5
HR	Haute Résolution	6-30
MR	Moyenne Résolution	31-100
BR	Basse Résolution	>100

Tableau 1.8. Présentation des différents facteurs déterminant le choix d'un couple capteur / plate-forme ou d'un type d'image.

Critère		Classes		Couple capteur / plate-forme ou type d'image	
Résolution spatiale		surface objet	largeur pixel		
	A	< 0,04 m ²	< 0,1 m	drone, hélicoptère	
	B	0,04 - 100 m ²	0,1 - 5 m	orthophotographies IGN ; satellites optiques THR et EHR	
	C	> 100 m ²	> 5 m	satellites optiques	
Résolution spectrale		radars		satellites radars	
	A	optique infrarouge		satellites optiques infrarouge (Terra, Spot 5)	
	B	optique visible		orthophotographies IGN ; satellites optiques visible	
Temporalité	Fréquence	A	intra-annuelle	satellites / drone	
		B	pluriannuelle	orthophotographies IGN	
Ancienneté		A	> 50 ans	orthophotographies IGN	
		B	10 - 30 ans	Landsat, Spot 4	
		C	< 10 ans	drone, autres satellites	
Homogénéité de la zone couverte		A	très bonne	orthophotographies IGN	
		B	bonne	drone (variation de la luminosité entre les clichés)	
		C	incertaine	satellites optiques	
Coût	tronçon 1*1 km	A	faible	< 100 €	orthophotographies IGN
		B	moyen	100 - 1 000 €	satellites Terra et Landsat
		C	élevé	> 1 000 €	drone, autres satellites
	tronçon 1*10 km	A	faible	< 1 000 €	satellites Terra et Landsat, orthophotographies IGN
		B	moyen	1 000 - 10 000 €	autres satellites
		C	élevé	> 10 000 €	drone
	tronçon 1*100 km	A	faible	< 1 000 €	satellites Terra et Landsat
		B	moyen	1 000 - 10 000 €	autres satellites, orthophotographies IGN
		C	élevé	> 10 000 €	drone

Le choix des orthophotographies de l'IGN correspond à un compromis qui se base sur différents critères. Par conséquent, ces images ne sont pas exemptes d'inconvénients, c'est le cas notamment de la fréquence d'acquisition des prises de vues, qui ne permet pas d'étude intra-annuelle.

Tableau 1.9. Présentation des niveaux de satisfaction.

	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Temporalité		Homogénéité de la zone couverte	Coût			Notes (à large échelle)
			Fréquence	Ancienneté		tronçon 1*1 km	tronçon 1*10 km	tronçon 1*100 km	
Drone	A	A / B	A	C	B	C	C	C	11,5
	3	2,5	3	1	2			1	
Orthophotographies IGN	B	B	B	A	A	A	A	B	14
	2	2	2	3	3			2	
Satellites optiques THR / EHR	B	A / B	A	C	C	B / C	B / C	B / C	11
	2	2,5	3	1	1			1,5	
Satellites optiques HR	C	A	A	B	C	C	A	A	13
	1	3	3	2	1			3	

Depuis la réalisation de cette étude fin 2007 / début 2008, de nouveaux capteurs sont apparus comme Worldview 2 ou Pléiades. Mais la mise à disposition de la bande infrarouge pour la BD Ortho[®] de l'IGN et sa gratuité pour les équipes de recherche nous confortent dans notre choix.

Les Modèles Numériques de Terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT) s'apparente à une image tridimensionnelle construite par ordinateur (Baud et al., 2003) représentant la topographie (altitude ou bathymétrie) de la zone couverte. Selon Robin (1995) il se définit comme « *un fichier de points qui se caractérise par une continuité spatiale de l'information contenant des points d'altitude renseignés soit par mesure ou soit par interpolation. Un MNT peut être obtenu sous forme vectorielle ou matricielle* ». Nous utilisons :

- ✓ le MNT de la BD Alti[®] de l'IGN, qui représente le relief sur le territoire national au pas de 50 m,
- ✓ le MNT accessible à partir de la BD Topo[®] qui a une résolution spatiale de 25 m.

Les données fournies par l'IGN ont l'avantage de couvrir l'ensemble de la zone étudiée et de façon uniforme.

b) Les données vectorielles

Ce sont des unités géographiques représentées par des objets ponctuels, surfaciques ou linéaires complétées par une information sémantique sous forme de tableaux de valeurs numériques (Béguin et Pumain, 2009 ; Denègre et Salgé, 1996). Trois types d'entités symbolisent les données vectorielles (Le Fur, 2007) (Figure 1.9) :

- ✓ le **point** représente un objet ponctuel et n'a ni surface, ni longueur. Il est défini par des coordonnées (X ; Y),
- ✓ la **ligne** qui figure des objets linéaires. Il s'agit d'un segment reliant deux points (X, Y). La ligne est définie par une longueur. Le principal objet linéaire utilisé est le référentiel hydrographique de la BD Carthage[®] (Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'eau et du ministère de l'Environnement) fourni par l'IGN,
- ✓ le **polygone** qui correspond à un objet surfacique. Il est constitué de lignes délimitant un espace. Les objets utilisés dans ces différents travaux :
 - sont extraits de la BD Ortho[®] par classification orientée-objet pour le bassin de la Drôme (objets : eau, végétation et bancs de galets),
 - sont issus de la BD Topo[®] pour l'ensemble du bassin RMC.

Chacun des objets, qu'il soit ponctuel, surfacique ou même linéaire, est défini par un attribut ou une série d'attributs, regroupés dans un tableau.

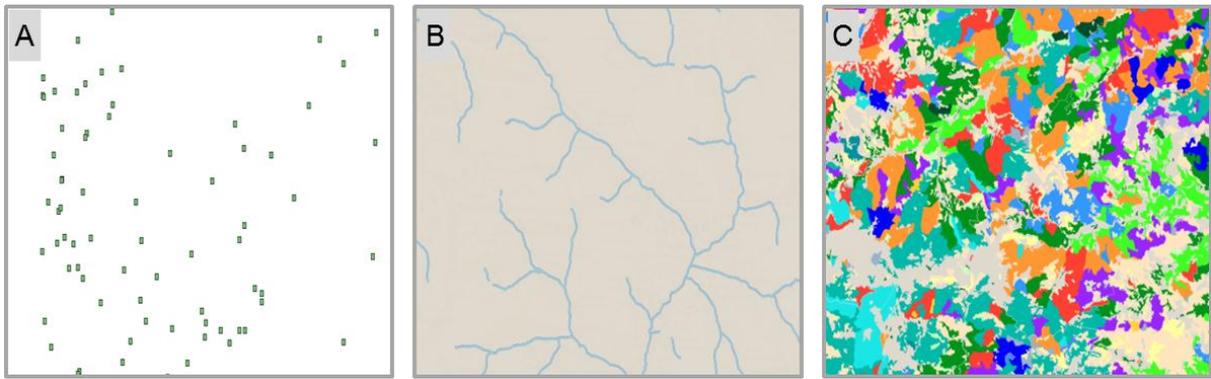


Figure 1.9. Illustration des différents types d'entités vectorielles : le point (A), la ligne (B) et le polygone (C) (Sources : Géoportail et Infoterre).

2.4. Le Système d'Information Géographique : outil d'analyse et de gestion

Le stockage, le traitement et l'affichage des données vectorielles et matricielles sont faits à l'aide d'un Système d'Information Géographique.

2.4.1. Généralités

L'objectif du Système d'Information Géographique (noté SIG) est de traiter et de communiquer de l'information géographique (Denègre et Salgé, 1996 ; Pomon, 2011). Ce qui différencie le SIG des autres systèmes d'informations est la notion de **spatialisation des données**. Le SIG regroupe dans un même ensemble une base de données et un ou plusieurs logiciels de traitement de l'information. Il facilite la possibilité de faire des requêtes en interrogeant les jeux de données, de les mettre à jour (Béguin et Pumain, 2009). L'utilisation d'un SIG pour gérer des données spatiales à très large échelle est devenue incontournable aujourd'hui.

2.4.2. Exemples d'applications

La banalisation des logiciels de SIG et leurs développements ont permis de répondre à des questions scientifiques ou à des besoins en termes de gestion. Les publications scientifiques liées à l'emploi du SIG en géomorphologie fluviale augmentent avec le nombre d'études dans ce domaine (Figure 1.7). Ces travaux peuvent avoir des objectifs d'application différents mais ils sont toujours liés à l'étude des milieux aquatiques à large échelle. Estimkart, projet porté par le CEMAGREF-IRSTEA a pour objectif d'intégrer des modèles d'habitats aquatiques sous SIG. Son avantage repose comme le précisent Lamouroux et al. (2010) sur la réunion des indices globaux nationaux et des réseaux de surveillance en les spatialisant. Le projet SYRAH (Système d'Audit Relationnel de l'Hydromorphologie), porté également par le CEMAGREF permet d'obtenir un outil évaluant les altérations physiques des cours d'eau, pouvant être à l'origine d'un mauvais état écologique au sens de la DCE.

L'objectif de notre travail est à terme, de rendre disponible une série de couches vectorielles ou *raster* décrivant les caractéristiques physiques d'un réseau hydrographique. Ce travail fournira des

métriques utiles à l'élaboration de nouveaux indicateurs permettant de juger l'état physique d'un réseau hydrographique à large échelle, celui du bassin du Rhône, tout en conservant une bonne qualité d'informations.

2.5. Logiciels utilisés pour le traitement et la gestion des données

Les couches de données traitées dans cette thèse ont été gérées à partir de la plate-forme d'ArcGIS Desktop d'ESRI (version 10). Elle permet de créer, de mettre à jour et d'analyser l'information géographique. C'est à partir de ce logiciel que les données vectorielles mais aussi matricielles ont été analysées. Pour les opérations spécifiques aux données images, nous avons utilisé les logiciels de la société Exelis Visual Information Solutions (anciennement ITT).

- ✓ Les opérations de mosaïquage ou d'exploration des images ont été faites à partir du logiciel ENVI® (the Environment for Visualizing Images). Il s'agit d'un logiciel spécialisé en traitement d'images et de télédétection permettant l'analyse et la visualisation des images (Thomas, 2005).
- ✓ La classification des images par méthode orientée-objet a été réalisée avec le logiciel ENVI EX.

Initialement les premiers tests réalisés sur le bassin de la Drôme pour la classification orientée-objet ont été exécutés avec le logiciel eCognition de Definiens. Les résultats présentés se basent sur la méthode mise en place dans le cadre de l'étude réalisée en 2009 (Wiederkehr et al., 2009) mais ont été effectués avec le logiciel ENVI EX dont les performances en terme de segmentation nous paraissent plus pertinentes.

2.6. Analyse quantitative des données : les outils statistiques

Les traitements statistiques ont été effectués avec plusieurs logiciels : StatView (version 5.0), PAST (version 1.84), SPSS (version 14.0) et R (version 2.14.1). Suivant le type et le nombre de variables étudiées, les techniques utilisées ont été différentes.

2.6.1. Métriques descriptives

Les statistiques descriptives sont essentiellement utilisées comme point d'entrée pour étudier des tableaux complexes (Walford, 2011). Il s'agit d'une première lecture des données. Pour une description simple des métriques, deux paramètres sont utilisés : la moyenne pour les données normalement distribuées et la médiane pour les autres. Dans ce cas-là, nous avons opté principalement pour une représentation des variables simples à partir de graphiques en boîtes (ou *box plot*) (Figure 1.10). Sur ce type de graphique figurent la médiane, le premier et le troisième quartile ainsi que le premier et le neuvième décile. L'intervalle interquartile correspond à la différence entre le premier et le troisième quartile.

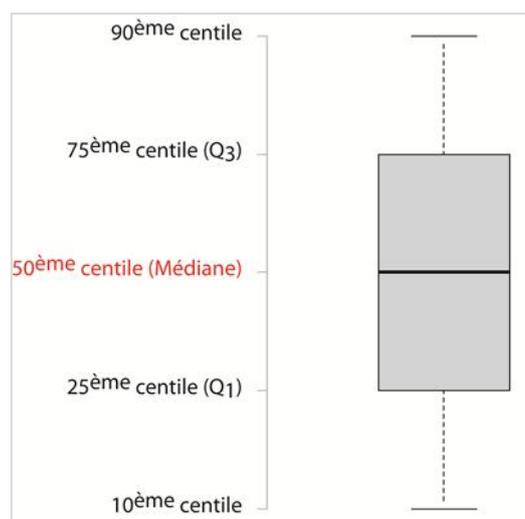


Figure 1.10. Interprétation des graphes en boîtes.

2.6.2. Analyse multidimensionnelle des données et modélisation

L'analyse multidimensionnelle des données permet une représentation synthétique des objets (variables ou bien individus). Deux types de méthodes se distinguent (Clément et Piégay, 2003) :

- ✓ D'une part, les **méthodes factorielles**. Il s'agit de représenter sur un plan factoriel l'ensemble des objets composant le tableau de données initiales. Chaque objet est représenté dans un plan euclidien par un point (Husson et al., 2009 ; Lebart et al., 1995). L'objectif est de réduire les dimensions de la matrice des données de départ. Pour cela, de nouveaux espaces de faibles dimensions sont créés. Ces espaces doivent correspondre au mieux à la réalité. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est largement utilisée en géomorphologie fluviale (Clément et Piégay, 2003 ; Grosprêtre, 2011 ; Llorens et al., 1997 ; Passmore et Macklin, 1994 ; Pont et Roditis, 1993 ; Schmitt et al., 2004 ; Yu et Oldfield, 1993). Elle permet la réduction du nombre de variables en jouant sur la corrélation des variables (Clément et Piégay, 2003), et du nombre d'individus selon la similitude existant entre les valeurs (Lebart et al., 1995).
- ✓ D'autre part, les **méthodes de classification**. Les objets sont classés soit par niveau de partitions, soit en fonction des liens hiérarchiques existant entre les objets. On parle alors de hiérarchie indicée ou dendrogramme. Le principal algorithme utilisé est celui de la « Classification Ascendante Hiérarchique », noté CAH.

L'analyse multidimensionnelle des données peut servir d'étape préalable à la mise en place de modèles. L'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) a servi à la conception de modèle. L'AFD également utilisée en géomorphologie fluviale (Gurnell, 1997 ; Howard et Hemberger, 1991 ; Liébault, 2003 ; Ridenour et Giardino, 1995 ; Woodsmith et Buffington, 1996) est une méthode prédictive et descriptive (Lebart et al., 1995).

L'objectif de cette thèse est de caractériser l'état physique du réseau hydrographique du bassin rhodanien au moyen d'indicateurs. Pour mettre en place ces référentiels, différentes étapes sont nécessaires.

Le travail à large échelle, si on y ajoute la contrainte d'avoir une donnée continue et homogène sur l'ensemble du réseau ne permet pas de faire des relevés de terrain. C'est pourquoi l'utilisation des outils géomatiques s'est révélée indispensable. Il faut en amont, lister les données brutes à partir desquelles seront extraites les métriques. Ces données doivent être numérisées pour gagner du temps lors du traitement. Les données fournies par l'IGN ont l'avantage de couvrir l'ensemble du territoire national, ce qui explique que les bases de données de l'IGN, BD Topo[®] et la BD Ortho[®], ont été sélectionnées.

Pour les données rastérisées, nous avons dû faire appel à des logiciels de traitement de l'image comme ENVI[®] et eCognition[®] avant de les convertir en données vectorisées. Les couches vectorielles ont été traitées à partir du logiciel de SIG ArcGis d'ESRI. L'utilisation de requêtes a permis d'extraire des métriques servant à créer des indicateurs.

Le post-traitement des métriques a nécessité l'utilisation de logiciels de statistiques, comme R ou SPSS. La visualisation des indicateurs de qualité physique se fait à l'aide d'un logiciel de SIG.

3. Problématique de recherche

La Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE) met en avant la notion de bon état écologique des milieux aquatiques qui s'évalue à partir de paramètres biologiques. L'amélioration de cet état conduit les opérateurs à agir sur les conditions physico-chimiques et hydromorphologiques des masses d'eau. Pour atteindre les objectifs de la DCE, il est donc nécessaire de disposer d'une évaluation de l'état physique du réseau hydrographique afin de savoir où intervenir pour le modifier et améliorer l'état écologique lui-même. De fait, la mise en œuvre de cette évaluation à large l'échelle (ex. : bassin du Rhône) soulève un certain nombre de questions scientifiques auxquelles il est nécessaire de répondre avant d'envisager toute application. En effet, si les indicateurs de l'état physique sont aujourd'hui bien établis à l'échelle des tronçons, la régionalisation de ce type d'informations pose des problèmes méthodologiques importants liés notamment à la très grande hétérogénéité des milieux à caractériser.

Jusqu'à récemment, les contraintes matérielles et humaines ne permettaient pas l'acquisition de données continues sur un vaste réseau. Les mesures étaient effectuées de manière ponctuelle et extrapolées à l'échelle du tronçon (Andriamahefa, 1999 ; Schmitt, 2001). Avec l'instauration de la DCE, la thématique de la régionalisation est de plus en plus au cœur des questions scientifiques. Les recherches à ce sujet en sont encore à leurs balbutiements (Chandesris et al., 2007 ; Lalande, En cours ; Tormos, 2010). Les données bien que pouvant être acquises de manière continue ne le sont pas toujours avec précision. Il est parfois nécessaire de réduire le nombre de données afin de privilégier la qualité.

Les enjeux sont importants puisqu'il s'agit de mettre en place des techniques de caractérisation physique des cours d'eau à large échelle, en exploitant au mieux les informations disponibles, sachant qu'il est nécessaire de disposer de données qui soient les plus homogènes possibles sur l'ensemble du bassin versant. Les progrès faits ces dernières années en géomatique aussi bien au niveau des techniques de traitement que des données disponibles ouvrent la voie à une caractérisation à large échelle du réseau hydrographique. La synthèse bibliographique réalisée en 2008 (Partie 1.A.2.3.2) montre que la BD Ortho[®] est le couple capteur / plate-forme le plus adapté pour renseigner des indicateurs de qualité physique des milieux aquatiques, à l'échelle de tronçons fluviaux de quelques kilomètres (abordés généralement dans un contrat de rivière ou un SAGE) et du réseau hydrographique du bassin du Rhône (échelle de planification retenue pour la mise en œuvre de la DCE).

L'objectif (Figure 1.11) de cette thèse est double.

- ✓ L'objectif premier est d'ordre **méthodologique** et se décompose en deux axes :
 - définir une méthode basée sur des **outils géomatiques ayant pour but de renseigner des indicateurs de qualité physique des masses d'eau** afin de caractériser les pressions anthropiques sur l'hydromorphologie dans le cadre de la mise en place de la DCE. Dans ce cadre, il s'agit notamment, en complément des démarches régionales et nationale mises en œuvre, de tester l'apport des **données images** pour la génération d'indicateurs spécifiques,

- constituer une **base de données** composée de métriques extraites à l'échelle du tronçon permettant l'élaboration **d'indicateurs d'évaluation hydromorphologique du bassin rhodanien**.
- ✓ Le second objectif présente un **but analytique**. Il s'agit d'étendre le champ d'investigations à l'ensemble du bassin rhodanien pour présenter une **première analyse géographique des indicateurs obtenus pour caractériser son état biophysique**.

L'originalité de ce travail de thèse repose sur la caractérisation physique des milieux aquatiques à l'ensemble du bassin Rhône Méditerranée Corse (RMC) à partir de métriques homogènes sur un linéaire continu de plus de 15 000 km. L'intérêt opérationnel repose sur l'utilisation d'outils géomatiques à partir de données vectorisées ou *rasters* pour caractériser les pressions anthropiques sur l'hydromorphologie. Il s'agit du moyen le plus pertinent pour optimiser l'acquisition de données, établir des diagnostics à large échelle et alimenter des modèles permettant d'établir des scénarios.

Pour atteindre ces objectifs, notre recherche s'est articulée autour de trois grandes parties :

1. développer un procédé (semi-)automatique d'extraction d'indicateurs d'évaluation de l'état physique à partir de données vectorisées ou *rasters* applicable à l'ensemble du bassin rhodanien. Cette méthode est composée de plusieurs étapes ordonnées : de la donnée brute à l'indicateur, en passant notamment par la création d'unités spatiales et de métriques (Partie 2),
2. appliquer cette méthode à différentes échelles du réseau hydrographique en abordant des thématiques diverses :
 - i. en déterminant et en utilisant les **tronçons fluviaux** (ou tronçons géomorphologiques homogènes) pour caractériser les milieux aquatiques sur deux territoires de tailles différentes :
 - a. la première est à une échelle d'une centaine de km, le long du linéaire **drômois**. Grace à la méthode mise en place, nous montrons comment *détecter les sites à fort potentiels patrimoniaux* de manière automatique en axant notre travail autour des tronçons géomorphologiques homogènes (Partie 3.Chapitre 1),
 - b. puis, nous étendons l'utilisation de ces tronçons géomorphologiques homogènes au **bassin RMC**, en mettant en place une base de données caractérisant l'état hydromorphologique du bassin et en *identifiant les styles fluviaux*. La détermination des styles permet non seulement de répondre à des questionnements scientifiques mais aussi d'apporter des précisions opérationnelles en termes de priorité d'actions, en *identifiant les zones présentant des caractéristiques biophysiques particulières* (fort potentiel d'érosion latérale ou importante diversité d'habitats par exemple) (Partie 3.Chapitre 2).
 - ii. en se centrant sur l'objet « eau » par identification des **méso-habitats** et en produisant des indicateurs de caractérisation des habitats aquatiques à large échelle

et illustrer ainsi la complexité de la mosaïque formée par les méso-habitats (Partie 4).

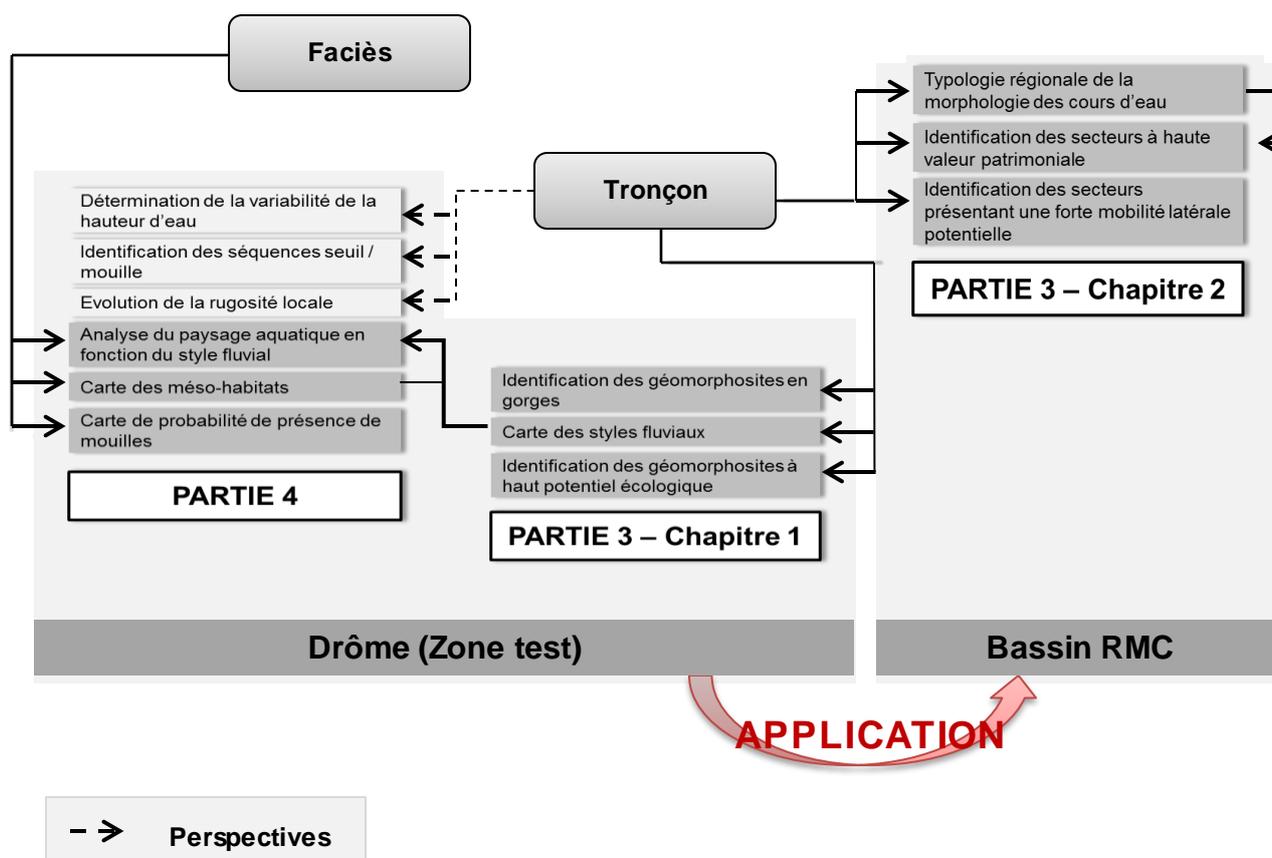


Figure 1.11. Schéma des axes de recherche développés dans cette thèse.

B. Cadre géographique et sources de données

1. Cadre géographique

Les méthodes qui sont développées dans cette thèse sont appliquées au réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse (RMC) géré par l'Agence de l'Eau RMC (1.1.1). Certains tests sont plus spécifiquement effectués sur le bassin de la Drôme (1.1.2).

1.1.1. Bassin Rhône Méditerranée Corse

a) Cadre administratif

La loi du 16 décembre 1964 (Journal officiel, 1964) relative « *au régime et à la répartition des eaux, et à la lutte contre leur pollution* » est à l'origine du découpage de la France métropolitaine en six grands bassins versants hydrographiques (Figure 1.12). Chacun d'eux est administré par une Agence de l'Eau, qui constitue l'organisme exécutif de la gestion des eaux (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse, Seine-Normandie). En 1992, des Comités de Bassin, regroupant acteurs privés et publics intervenant dans le domaine de l'eau, ont également été créés dans les Départements d'Outre-Mer (Guadeloupe, Guyane, Martinique, Réunion).



Figure 1.12. Représentation des 11 grands bassins hydrographiques français
(Sources : Site Rhin-Meuse – <http://www.eau-rhin-meuse.fr/>)

Le travail présenté fait référence à un vaste territoire qui, avec plus de 125 000 km², représente quasiment le quart de la superficie de la France. Il s'agit du bassin Rhône Méditerranée Corse géré par l'Agence de l'Eau RMC et comptant 14 millions d'habitants (Site AERMC). Il réunit la partie française du bassin versant rhodanien, les bassins des fleuves du littoral méditerranéen, ainsi que

la Corse (Sauquet, 2000). Ce territoire est constitué par plusieurs milliers de km de réseau hydrographique allant du simple torrent de montagne au vaste fleuve Rhône.

Le bassin RMC qui se répartit entre neuf régions et trente départements, dont onze partiellement, se caractérise par des conditions climatiques, écologiques voire géologiques très contrastées, allant des massifs alpins au littoral méditerranéen en passant par la vallée du Rhône. Cet espace est, drainé par plus de 6 500 cours d'eau de plus de deux kilomètres, le bassin RMC est également riche en plans d'eau (lac Léman, lac d'Annecy, lac du Bourget...), glaciers et zones humides, comme la Camargue ou les Dombes (www.eaurmc.fr). Le chevelu dense qui recouvre ce bassin est de taille très diverse.

b) Le Rhône

Le Rhône est un des grands fleuves européens (Bravard et Clemens, 2008). Il prend sa source en Suisse, au glacier de la Furka, à 1 753 m d'altitude dans le massif du Saint-Gothard. Il est long de 812 km, dont 500 km en France. Drainant un bassin versant de plus de 98 000 km², les diversités climatiques et géologiques traversées sont importantes. Bravard et Clemens (2008) distinguent cinq grandes entités hydrographiques.

- ✓ Le **Rhône alpestre**. Il s'agit de la partie suisse du fleuve comprenant le lac Léman. De sa source à son entrée dans le lac, le Rhône n'est qu'un torrent, qui traverse des vallées accidentées et à haute altitude sur 165 km. Le lac Léman s'étend sur 70 km. À sa sortie, la surface drainée est de 8 000 km².
- ✓ Le **Haut-Rhône français** est un secteur sinueux se situant entre le Léman et la Saône. Le Rhône, sur plus de 200 km, traverse à la fois des gorges étroites, comme celles de Bellegarde et de Yenne, et de larges plaines d'inondations (Chautagne).
- ✓ Le **Rhône Moyen** à partir de Lyon, contraint par la présence du Massif Central à l'ouest et les Préalpes à l'est, s'écoule sur un axe nord-sud de 260 km.
- ✓ Le **Rhône Inférieur** suit toujours un axe nord-sud sur 160 km et se caractérise par une succession de plaines alluviales. Il s'étend sur une zone comprise entre l'Isère et la pointe nord du delta.
- ✓ Le **delta**. En amont de la ville d'Arles, le Rhône se divise en deux bras formant une plaine deltaïque : le bras occidental est appelé le Petit Rhône, quant au bras oriental, il est nommé le Grand Rhône. Cette plaine, la Camargue, a une superficie de 1 740 km².

En France, le Rhône est, avec un module interannuel de 1 700 m³/s à l'embouchure, le fleuve le plus puissant. Il traverse des régions variées et est soumis à des climats différents qui lui donnent un régime complexe. La rareté des conditions d'étiages est due à la diversité des régimes qui alimentent le fleuve : glaciaire, nival et pluvial. Deux climats influencent le bassin rhodanien : d'une part le climat océanique, qui se caractérise par d'abondantes pluies en hiver et d'autre part un climat méditerranéen qui se caractérise par de fortes pluies automnales (Bravard et Clemens, 2008).

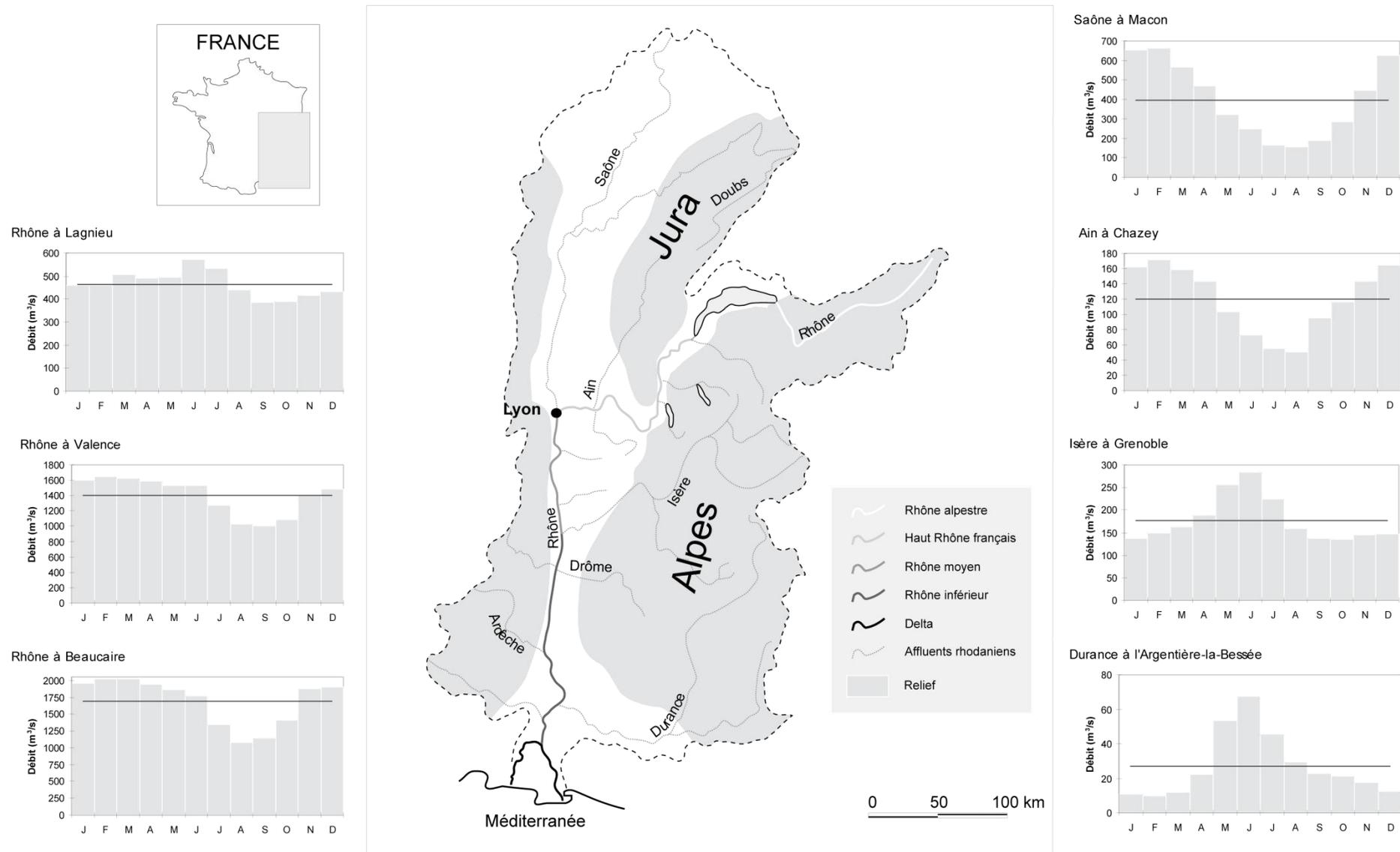


Figure 1.13. Variabilité des régimes hydrologiques au sein du bassin versant du Rhône.

c) Principaux affluents

L'Ain, la Saône, l'Isère et la Durance sont les quatre principaux affluents du Rhône, drainant à eux seuls 60% du bassin rhodanien (Bravard et Clemens, 2008) (Figure 1.13). Les affluents secondaires sont, de l'amont vers l'aval en rive gauche : l'Arve, le Fier, le Guiers, la Bourbre, la Drôme et en rive droite la Valserine, le Gier, l'Ouvèze, l'Ardèche et le Gard. Les affluents alimentant le Rhône sont issus de zones géologiques et climatiques variables.

L'Ain, principal affluent du Haut Rhône, est long de 230 km (Rollet, 2007). Il draine un bassin versant de 3 750 km², principalement dans la partie occidentale du Jura méridional. La Saône, qui prend sa source à Vioménil, est avec une longueur de 480 km la première rivière française. Son bassin versant a une superficie d'environ 30 000 km². L'Isère, longue de 290 km, draine un bassin de 11 800 km². Elle prend sa source dans les Alpes. La Durance, affluent issu des Préalpes, draine un bassin de 14 300 km² soumis à un climat méditerranéen (Bravard et Clemens, 2008).

1.1.2. Bassin de la Drôme

La Drôme est un affluent du Rhône (Figure 1.14) situé en rive gauche (ordre de Strahler : 6), prenant sa source à la Bâtie-des-Fonds à 1 300 m d'altitude. Cette rivière longue de 106 km draine un bassin versant de 1 640 km². Elle parcourt les massifs marneux du Diois et la bordure méridionale du Vercors (Dufour, 2005). Elle est caractérisée par un régime hydrologique préalpin et un climat méditerranéen avec des étiages prononcés en période estivale (2 m³/s à Saillans) et des crues au printemps et à l'automne. À partir de Crest, l'écoulement d'est en ouest se fait au sein d'une large plaine alluviale. Le débit annuel moyen est de 17,7 m³/s à Saillans (données calculées sur une période de 100 ans à partir de la Banque Hydro – www.hydro.eaufrance.fr) et un débit spécifique annuel de 15,4 L/s/km².

La Drôme se caractérise dans sa basse vallée par un style en tresses, dû à la forte érodabilité des berges, à une charge de fond importante combinée à d'importantes pentes et à un régime hydrologique contrasté (Landon et al., 1998). Mais une grande partie de son cours est impactée par les interventions humaines : endiguements et extraction en lit mineur. Les actions anthropiques sont à l'origine d'une disparition progressive des secteurs en tresses. Ceux-ci ne subsistent que sur certaines zones, comme à l'amont et à l'aval du secteur endigué situé à proximité d'Alex (Dufour, 2005). Ici, les travaux d'endiguement ont été réalisés entre la fin du XVIII^{ème} siècle et le milieu du XIX^{ème} siècle (Landon et al., 1998).

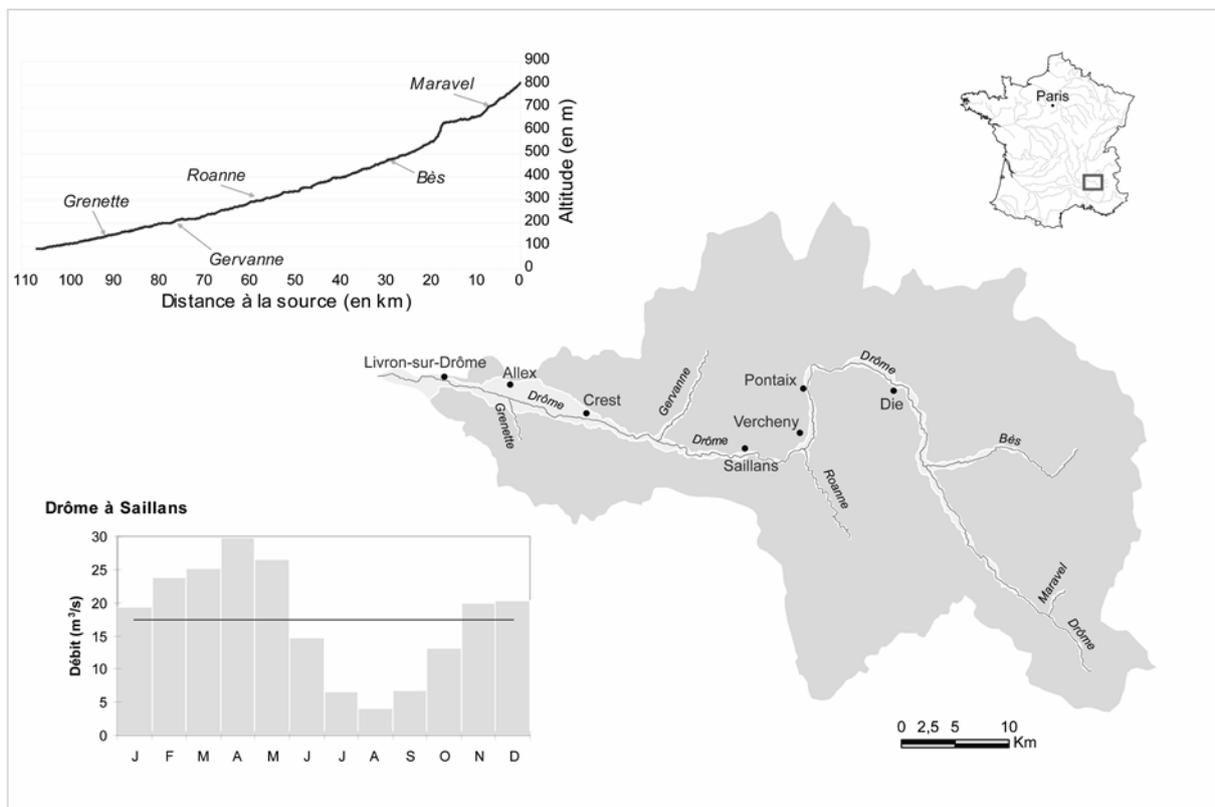


Figure 1.14. La Drôme et son bassin versant.

Ce bassin a été choisi comme secteur d'études car il se caractérise par des milieux fluviaux très contrastés, avec notamment des secteurs de tressage, endigués ou pas, des gorges et des tronçons rectilignes (Piégay, 1997). De plus, les liens fonctionnels existants entre la rivière et sa plaine alluviale sont à l'origine d'écosystèmes de qualité. Aussi bien d'un point de vue physique que biologique, le système drômois offre ainsi une diversité paysagère qui en fait un objet d'étude pertinent pour tester différentes approches de caractérisation physique d'un réseau.

2. Sources de données utilisées

2.1. Description des données rastérisées : la BD Ortho[®]

Cette base de données regroupe une série de photographies aériennes à très haute résolution spatiale (50 cm) dans le visible (rouge, vert, bleu) rectifiées géométriquement (Wiederkehr et al., 2009) prises à partir d'un capteur aéroporté, répondant aux différentes exigences requises pour une étude hydromorphologique à petite échelle (Wiederkehr et al., 2008) : une couverture homogène couvrant tout le territoire français avec une résolution spatiale permettant de caractériser un réseau hydrographique déjà conséquent. Les premières archives disponibles ayant la même couverture spatiale remontent aux années 1930.

Malgré cela, la BD Ortho[®] présente quelques défauts (Tableau 1.10), comme la variation de luminosité entre les dalles qui correspondent aux plaques photographiques (1x1 km ou 5x5 km) vendues par l'IGN. L'autre inconvénient de la BD Ortho[®] est sa taille. En effet, la quantité de données numériques nécessaires pour couvrir l'ensemble du bassin hydrographique du Rhône est

de l'ordre de deux téraoctets. Une telle masse de données pose des problèmes de stockage mais également de temps de traitement.

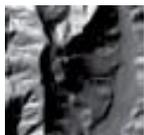
Tableau 1.10. Caractéristiques de la BD Ortho de l'IGN® (Wiederkehr et al., 2008).

Généralités	
Résolution spatiale	50 cm
Résolution spectrale	3 canaux : visible (rouge, vert, bleu)
Fréquence d'acquisition	tous les 5 ans (à moyen terme, tous les 3 ans)
Taille d'une dalle	5 km * 5 km ou 1 km * 1 km
Dates d'acquisition	entre 2003 et 2006, selon les départements
Avantages	Inconvénients
Très haute résolution	Limites de l'image (ombres portées, ...)
Archives	Stockage
Disponibilité	Différence de luminosités entre les dalles

2.2. Description des données vectorielles

Plusieurs couches vectorielles issues des données IGN sont utilisées dans cette thèse (Tableau 1.11).

Tableau 1.11. Caractéristiques des données brutes utilisées pour l'extraction de l'image à l'intérieur du fond de vallée (Wiederkehr et al., 2009).

	BD Alti®	BD Ortho®	BD Carthage®
Caractéristiques	Modèle Numérique de Terrain (50 m)	Orthophotographies (50 cm)	Référentiel hydrographique
Type de données	Raster	Raster	Vecteur
Sources	IGN	IGN	IGN, MEDD et Agence de l'Eau
			

2.2.1. La BD Topo®

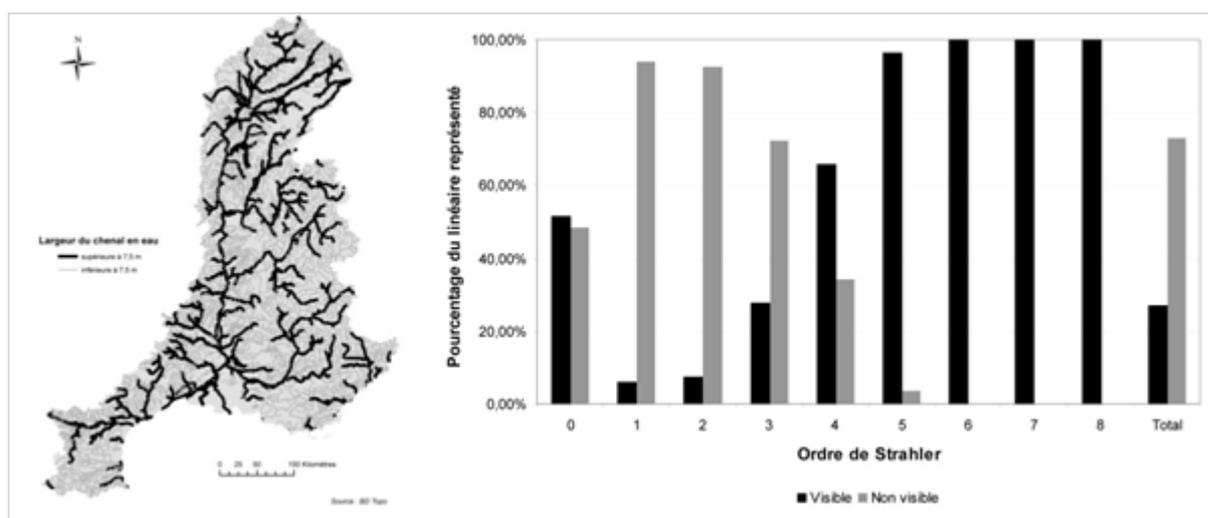


Figure 1.15. Représentation continue du réseau hydrographique de la BD Topo® du bassin Rhône et Méditerranée (Wiederkehr et al., 2008).

Les informations accessibles à partir de la base de données BD Topo® concernent l'occupation du sol à l'échelle nationale. Il s'agit d'une description de précision métrique du territoire et de ses infrastructures (www.ign.fr) : végétation, bâtiments, réseau hydrographique, Cette base de données, issue de la numérisation photogrammétrique, offre par rapport à une classification de photographies, l'avantage d'être déjà interprétée, évitant ainsi une étape supplémentaire d'extraction de l'information à partir des images brutes. Toutefois, l'absence d'accès à l'image d'origine, rend opaque les choix retenus lors de l'interprétation des photographies. Par exemple, le chenal en eau, dont la largeur est inférieure à 7,5 m est représenté par un simple linéaire. Donc seulement les segments de cours d'eau dont la largeur est supérieure à 7,5 m sont représentés par des polygones de surface, permettant ainsi d'obtenir des indicateurs comme la largeur du chenal actif. Nous avons réalisé une carte en partant de l'embouchure du Rhône et en remontant le réseau. À chaque fois, que le réseau n'est plus représenté par des polygones, nous avons posé une limite. Ainsi nous montrons qu'un peu moins de 30% du linéaire peut être étudié de manière continue avec des indicateurs basés sur des métriques continues (Figure 1.15).

De plus, selon les départements, certaines informations (Tableau 1.12), comme la végétation, ne sont pas accessibles ou seulement de manière partielle. Certains objets ne correspondent pas à la dernière mise à jour. Ainsi, si on observe la Durance à partir du Géoportail, on remarque que les chenaux en eau figurant sur les photographies aériennes ne correspondent pas à ceux de la couche vectorielle hydrographique (Figure 1.16).

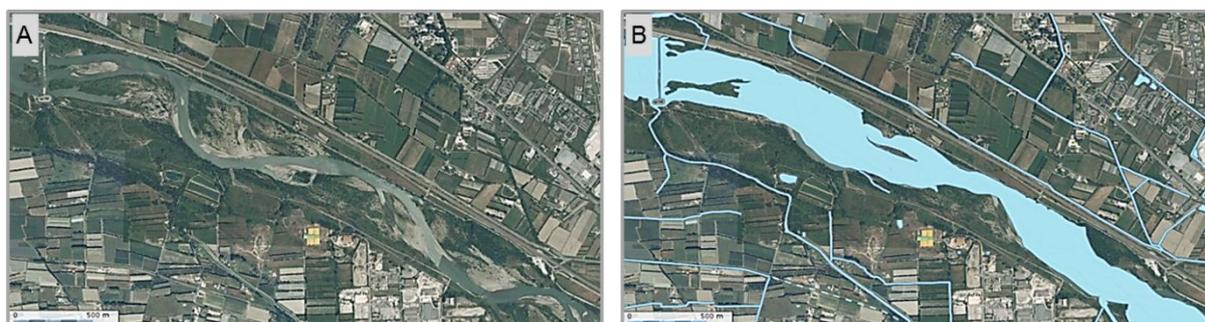


Figure 1.16. Illustration des différences entre la photographie (A) et la donnée de la BD Topo® (B) (Source : Géoportail version 2).

Malgré ces réserves, l'utilisation de cette base de données vectorisée demeure un complément intéressant aux images (Wiederkehr et al., 2008).

Tableau 1.12. Présentation des avantages et des inconvénients de la BD Topo® par rapport aux orthophotographies.

	Interprétation	Homogénéité	Temporalité
Avantages	Fournie	Données vectorisées et uniformes sur l'ensemble du territoire	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Non maîtrise de l'interprétation : informations incomplètes (végétation, galets) - Choix arbitraire de la représentation des données (par exemple, largeur des chenaux inférieure à 7,5 m) - Pas d'accès à l'information brute 		Ancienneté de l'information inexistante

2.2.2. La BD Carthage®

Le référentiel hydrographique principalement utilisé est extrait de la BD Carthage®. Cette base de données représente le réseau hydrographique français. Elle est élaborée à partir de la couche hydrographie de la BD Carto® (www.ign.fr). Elle comporte des informations fournies par le ministère de l'environnement et les agences de l'Eau au sujet du réseau et des zones hydrographiques, de leur découpage et de leur codification.

2.2.3. Le Réseau Hydrographique Théorique (RHT)

Le Réseau Hydrographique Théorique a été créé par le Cemagref (Pella et al., 2012). Il s'agit d'un réseau coulant national proche de celui de la BD Carthage® construit à partir du réseau hydrographique étendu (Pella et al., 2008) et de la BD Alti® de l'IGN. Le réseau est inséré au modèle numérique de terrain. Ainsi on a une meilleure identification des limites du bassin versant et une meilleure estimation des écoulements. Au sein d'un Système d'Information Géographique chacun des arcs composant le réseau s'est vu attribuer des paramètres environnementaux

(hydrologiques, topographiques, écologiques et climatiques), calculés à partir de la plate-forme de modèles écohydrologiques Estimkart (Lamouroux et al., 2010).

Le bassin du Rhône représente un vaste territoire de 95 500 km² (130 000 km² pour le bassin RMC). Il est caractérisé par des paysages bien différents qui en rendent son étude d'autant plus complexe. C'est pourquoi, si l'on souhaite utiliser les mêmes métriques sur l'ensemble du bassin que ce soit dans les Alpes ou aux abords de la mer Méditerranée, il est indispensable de tenir compte de cette diversité aussi bien orographique que climatique. Pour y parvenir il faut disposer de données brutes homogènes sur l'ensemble du territoire étudié. Cela explique que nous ayons privilégié les données de l'IGN et celles du Cemagref qui sont disponibles à l'échelle nationale au détriment de données peut-être plus précises mais couvrant de plus petits ensembles.

L'élaboration de différents indicateurs de caractérisation de l'état physique du bassin du Rhône nécessite des phases de tests à réaliser sur des bassins de dimensions plus modestes. L'intérêt du bassin de la Drôme s'explique par le fait que c'est un bassin de taille plus humaine qui a déjà été à maintes reprises étudié aussi bien au niveau hydrologique que morphologique permettant des comparaisons. De plus, le cours d'eau est caractérisé par des styles fluviaux nettement différenciés (tressage, endiguement) tout au long de son continuum.



Partie 2. Méthode générale

*Procédé d'élaboration d'indicateurs d'évaluation de
l'état physique d'un cours d'eau*

*Outils géomatiques et objets utilisés pour l'analyse
d'un réseau hydrographique*

A. Prétraitement de données brutes

1. Objectif : homogénéisation des données
2. Simplification des données vectorielles
3. Optimisation du temps de traitement des orthophotographies

B. Extraction d'objets élémentaires

1. Au sein de la bande fluviale à partir de données vectorielles
2. Au sein du fond de vallée à partir de données rasters

C. Création d'unités spatiales

1. Objectif : mettre en place une unité de base pour l'analyse spatiale
2. Unités spatiales extraites des données vectorielles : les objets géographiques désagrégés (DGO)
3. Unités spatiales extraites des données rasters : les polygones intra-chenaux
4. Unités spatiales réagrégées

D. Extraction de métriques

1. Caractérisation des objets élémentaires par des métriques brutes
2. Construction de métriques synthétiques par agrégation spatiale
3. Extraction d'une structure spatiale par les métriques structurales
4. Construction de métriques temporelles par agrégation d'états

E. Élaboration d'indicateurs d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau

Dans cette partie, nous présentons la démarche (Figure 2.17), basée sur des outils géomatiques, que nous avons mis en place. Elle sert à renseigner des indicateurs de qualité physique des masses d'eau. Il s'agit de créer une boîte à outils qui repose sur une procédure en cinq étapes, à partir des données brutes (vectorielles ou rasters). Celles-ci suivant les besoins seront traitées ou utilisées comme telles afin d'extraire des objets ayant une réalité géographique. Ces objets seront par la suite segmentés en unités spatiales permettant l'extraction de métriques qui serviront à la constitution d'indicateurs d'état physique du réseau hydrographique. L'intérêt de cette boîte à outils est sa facile adaptation à différents types de données. Il ne s'agit pas d'un outil figé. Il est applicable à des données diverses, à des secteurs géographiques différents. L'intérêt de cette procédure repose sur la qualité et la pertinence des données acquises à l'échelle de grands bassins. Les métriques sont extraites de manière continue et non pas à l'échelle de la station. De plus, la semi-automatisation de cette méthode permet d'envisager une utilisation sur d'autres bassins et offre la possibilité de compléter la base de données par de nouvelles métriques au fur et à mesure que nous élargissons le champ d'investigations.

A. Prétraitement de données brutes

1. Objectif : homogénéisation des données

Nous avons fait le choix d'utiliser des outils et bases de données numériques pour établir une caractérisation physique des masses d'eau. Pour cela, nous avons collecté des données déjà existantes. Celles-ci peuvent provenir d'institutions à l'échelle nationale (IGN, IFEN, ...) ou de laboratoires de recherche, qui les ont constituées pour répondre à une question précise sur un secteur défini. Dans cette thèse, les données de l'IGN ont été privilégiées. Elles couvrent de manière relativement uniforme le terrain d'études, le bassin RMC.

Toutefois ces données (*rasters* ou vecteurs) ne sont pas toujours exploitables telles quelles. L'étape dite de « prétraitement » permet de mettre en forme les données afin de les rendre utilisables pour l'évaluation de l'hydromorphologie du bassin. Dans le cas de données vectorielles de la BD Topo[®], il est nécessaire de « simplifier » les données. Il s'agit de les mettre en forme pour obtenir *in fine* les objets géographiques intéressant le géomorphologue, comme la bande fluviale ou le chenal en eau. Quant aux données *rasters* de la BD Ortho[®], il s'agit principalement d'alléger la masse de données ainsi que de minimiser des problèmes radiométriques éventuels.

2. Simplification des données vectorielles

Initialement, l'objectif de cette thèse était de constituer la base de données uniquement à partir de données vectorielles extraites de la BD Ortho[®]. Cela n'est pas possible à l'heure actuelle sur l'ensemble du réseau hydrographique pour différentes raisons : contrastes trop importants entre les images, dates des clichés s'étalant sur une longue période, forte variabilité de l'occupation du sol, de la profondeur de l'eau et du relief (ensoleillement). De plus, les temps de calcul sont relativement longs. Ce qui nous a conduits à opter pour des données vectorielles préexistantes (BD Topo[®]). S'agissant d'une source de données déjà interprétées et représentées de manière uniforme sur l'ensemble du territoire, l'utilisation de cette base de données, malgré certaines limites, permet un gain de temps par rapport à des méthodes de classification. L'exploitation des données vectorielles permet d'extraire des informations portant sur la géométrie et la nature des objets paysagers composant le corridor fluvial.

L'absence de mesures sur le terrain nécessite l'utilisation de données vectorielles représentant le tracé en plan du cours d'eau. De fait, nous avons choisi de constituer un jeu de données sous une forme surfacique pour étudier le tracé en plan du réseau hydrographique et sous une forme linéaire pour compléter les données du profil en long. Ainsi, nous obtenons dans un premier temps des polygones « eau », « bancs » et « eau+bancs » sur l'ensemble du bassin (Figure 2.2).

Pour représenter linéairement les informations, nous devons disposer d'une couche vectorielle sous forme de polyligne. Les couches vectorielles existantes ne sont pas satisfaisantes pour être conservées en l'état. En effet, la couche « tronçon » de la BD Topo[®] fournit un réseau bien trop

dense pour être facilement exploitable alors que la couche « Hydro » de la BD Carthage® offre un réseau plus allégé mais avec un tracé trop approximatif. Pour résoudre les problèmes liés à ces deux réseaux, nous avons créé un nouveau référentiel issu de la fusion de deux couches (par une fonction d'accrochage, le « *snapping* ») (Figure 2.1). Ce qui donne un réseau hydrographique d'environ 47 220 km de long sur le bassin RMC.

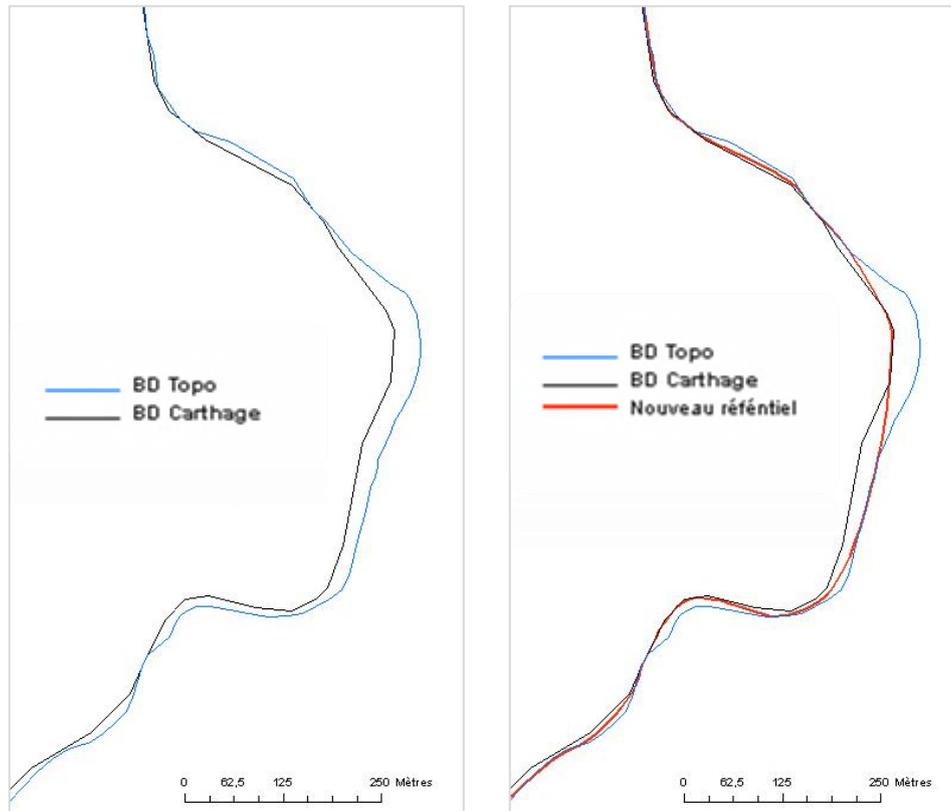


Figure 2.1. Présentation du nouveau référentiel en fonction de la couche « Hydro » de la BD Carthage® et la couche « Tronçon » de la BD Topo®.

Méthode pour extraire les éléments composant la bande active à partir de la BD Topo® :

La bande active est une entité qui intègre les chenaux en eau et les bancs de galets non végétalisés. La bande fluviale correspond à la bande active et aux îles végétalisées. Afin d'extraire de la BD TOPO® cette bande active, les éléments de la couche SURFACE_EAU, qui correspondent à la bande active, ont été sélectionnés. Ils sont contenus dans les fonds de vallées et intersectent la couche TRONCON_COURS_EAU ou lui sont adjacents. Les éléments lacs, bassins et gravières ont ensuite été éliminés. Après fusion de tous les éléments des bandes actives, un axe médian est généré. Afin d'avoir une continuité amont – aval, les éléments de la couche TRONCON_COURS_EAU situés entre plusieurs secteurs de bande active non continus sont récupérés. Ces éléments serviront d'axe médian pour les secteurs où la bande active n'a pas été digitalisée. Les axes médians des bandes actives avec ces portions de la couche TRONCON_COURS_EAU sont associés afin d'obtenir un axe médian continu. La nature des éléments de la bande active est ensuite identifiée. Pour les secteurs où la bande active n'était pas digitalisée, les portions de l'axe médian sont identifiées comme fictives. Les entités où le champ Régime indique « permanent » sont identifiées comme les chenaux en eau ; et pour le Régime « intermittent », les entités sont identifiées comme des bancs de galets non végétalisés.

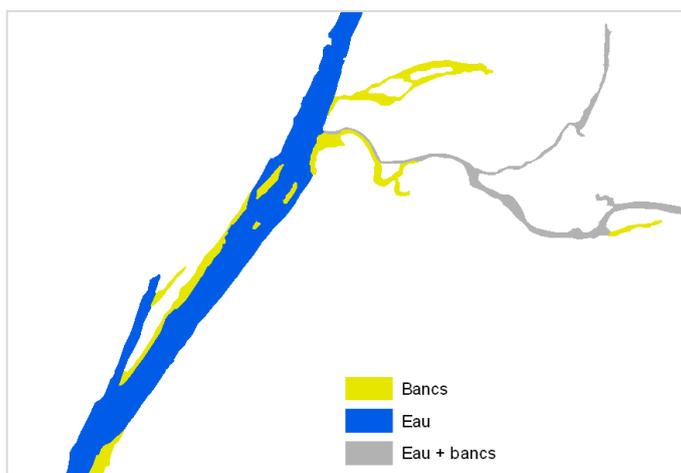


Figure 2.2. Polygones extraits à partir de données de la BD Topo®.

3. Optimisation du temps de traitement des orthophotographies

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente (Partie 1.A.2), la BD Ortho[®] de l'IGN est le support image le mieux adapté pour répondre aux contraintes imposées pour la réalisation d'une étude en hydromorphologie fluviale à large échelle. Mais avec plus de 6 300 dalles couvrant le bassin RMC le temps de traitement et d'analyse peut facilement être chronophage et ce, malgré les progrès réalisés ces dernières années par les logiciels de télédétection.

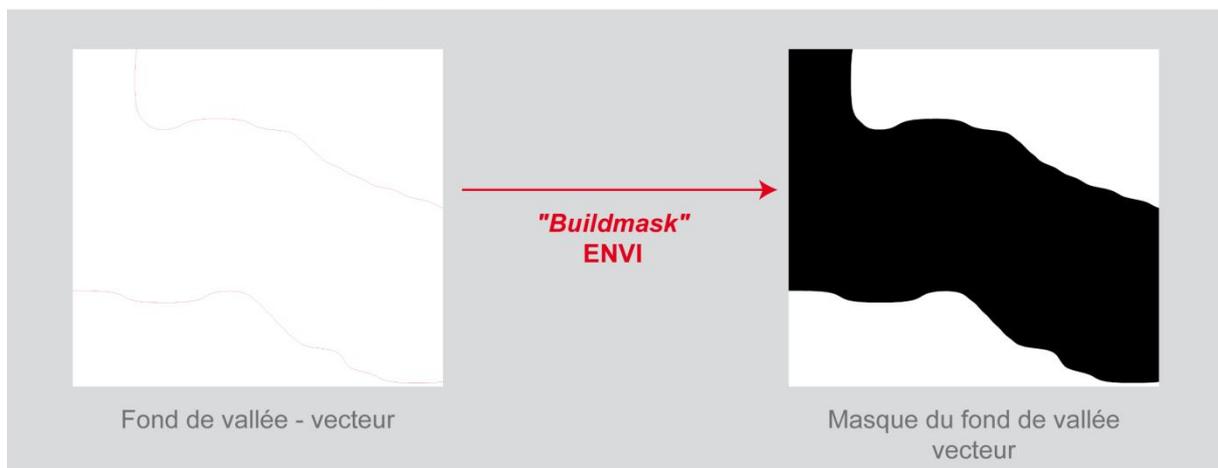
Par conséquent, la première tâche à accomplir est de rendre la chaîne de traitement plus rapide et donc plus efficace. C'est pourquoi nous avons pris le parti d'alléger la donnée à traiter. Pour y parvenir, il suffit de conserver sur les orthophotographies la zone d'étude concernée par notre recherche. Dans cette perspective, nous avons retenu comme objet géographique de référence le *fond de vallée* défini par Alber et Piégay (2011). C'est à l'intérieur de cet objet que les métriques ont ensuite été extraites. Ce fond de vallée correspond au remplissage alluvial holocène, également appelé la plaine d'inondation. Il permet de délimiter l'espace maximal dans lequel le cours d'eau peut potentiellement se déplacer et il apporte une information sur la capacité de divagation du cours d'eau. Le fond de vallée a été créé à partir des espaces alluvionnaires construits depuis la fin de la glaciation du Würm (- 12 000 ans) (Alber et Piégay, 2011).

3.1. Procédure d'extraction d'images à l'intérieur du fond de vallée

Une couverture rastérisée issue de la BD Ortho[®] contenant uniquement les fonds de vallée du bassin drômois a été créée. L'extraction des images a été faite en utilisant une couche rastérisée, l'orthophotographie et, une couche vectorielle représentant le fond de vallée.

À l'instar d'Alber et Piégay (2011), nous avons considéré le fond de vallée comme l'objet géographique correspondant au sommet du remblaiement alluvial holocène, également nommé la plaine alluviale. Assimilée à l'espace maximal au sein duquel le cours d'eau peut potentiellement se déplacer, inonder ou alluvionner (Piégay et al., 2005b), la plaine alluviale est une entité clé. L'objet vectoriel représentant le fond de vallée a été construit à partir du modèle numérique de terrain issu de la BD Topo[®] de l'IGN et de la couche vectorielle extraite de la BD Carthage[®]. Il s'agit d'assimiler le fond de vallée à l'espace inondable pour une hauteur d'eau en lit majeur dont le seuil est une valeur constante (Williams et al., 2000) ou une fonction de la taille du cours d'eau et d'un débit de référence (Dodov et Fofoula-Georgiou, 2006 ; Hall et al., 2007).

Création d'un masque représentant le fond de vallée



Extraction de l'image dans le fond de vallée

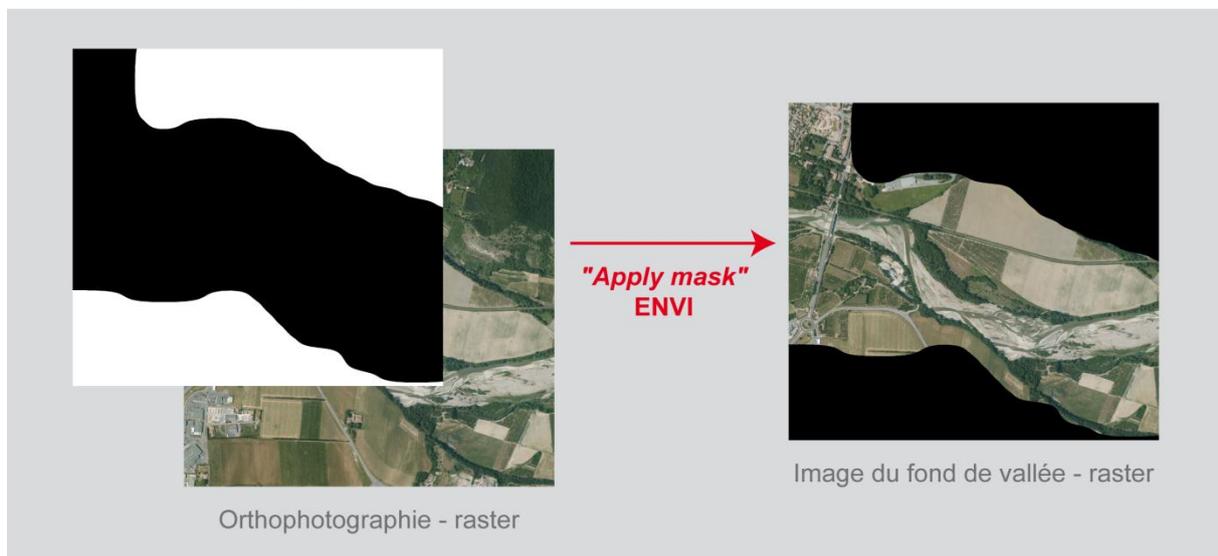


Figure 2.3. Extraction de l'image à l'intérieur de l'objet géographique « fond de vallée ».

Nous avons extrait le réseau hydrographique de la BD Carthage[®] et appliqué une statistique zonale sur ce réseau pour créer sous forme rasterisée un plan de référence altimétrique. Le MNT de la BD Topo[®] a été soustrait à ce plan de référence afin de construire un MNT relatif. Ont alors été extraites les cellules dont la valeur était inférieure au seuil fixé de manière empirique à 10 m dans les zones montagneuses, et à 5 m dans les zones à faible relief. Finalement, cette couche *raster* a été convertie en entité vectorielle (Wiederkehr et al., 2010b). Nous avons utilisé le fond de vallée comme masque afin d'extraire une couverture rasterisée issue de la BD Ortho[®] de l'IGN couvrant uniquement ces espaces. Pour y parvenir, nous avons procédé en deux étapes en utilisant le logiciel ENVI (Figure 2.3) :

- ✓ La première étape consiste à créer un masque du fond de vallée. Ce traitement se fait à partir de la fonction « *build mask* ».

- ✓ La seconde étape a pour but d'extraire l'image à l'intérieur du fond de vallée. Pour cela, nous utilisons la fonction « *apply mask* », une nouvelle image est créée représentant uniquement le fond de vallée.

3.2. Réduction des problèmes de luminosité

À l'étape précédente, nous obtenons une image par dalle IGN avec uniquement le fond de vallée. Les images issues de la BD Ortho[®] ne se superposent pas : elles sont adjacentes (Figure 2.4). Afin de réduire le nombre de manipulations (une par image), nous avons décidé de les mosaïquer pour en former des plus grandes. De plus, bien que les images soient issues de la même base de données, il n'est pas rare que deux images adjacentes n'aient pas la même luminosité, faisant apparaître un fort contraste. Ce problème peut également apparaître au sein d'une même dalle IGN.

Pour pallier ce problème d'écarts de luminosité entre les dalles, nous avons procédé en deux étapes (Lejot, 2008 ; Wiederkehr et al., 2009).

- ✓ Dans un premier temps, la distribution radiométrique a été homogénéisée pour chaque dalle par le biais d'un étirement radiométrique (à partir de la fonction « *interactive stretching* » du logiciel ENVI).
- ✓ Dans un second temps, un ajustement dynamique a été effectué entre plusieurs images. La radiométrie de l'image à corriger a été ajustée à l'image de référence (fonction « *mosaïquage* » du logiciel ENVI).

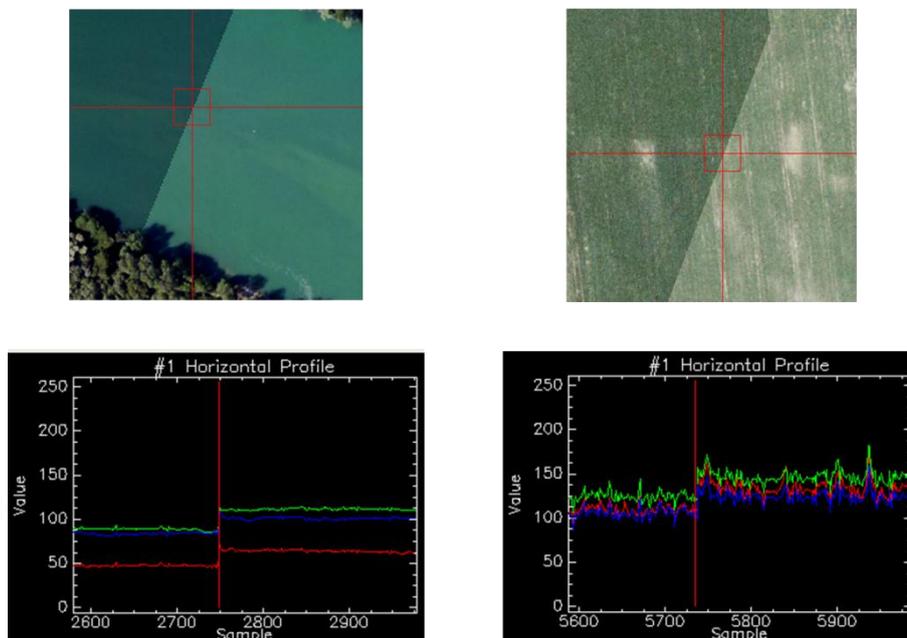


Figure 2.4. Différence de radiométrie au sein d'un même objet.

B. Extraction d'objets élémentaires

1. Au sein de la bande fluviale à partir de données vectorielles

Le prétraitement de la BD Topo[®] (Partie 2.A.2) a donné sur l'ensemble du bassin RMC, les polygones « bancs », « eau » et « eau + bancs », qui représentent une superficie de 1 146 km². Dans l'optique de distinguer d'une part les chenaux uniquement en eau et d'autre part, les chenaux où des bancs alluviaux sont présents, nous avons fusionné les polygones selon les règles définies ci-dessous (Tableau 2.1).

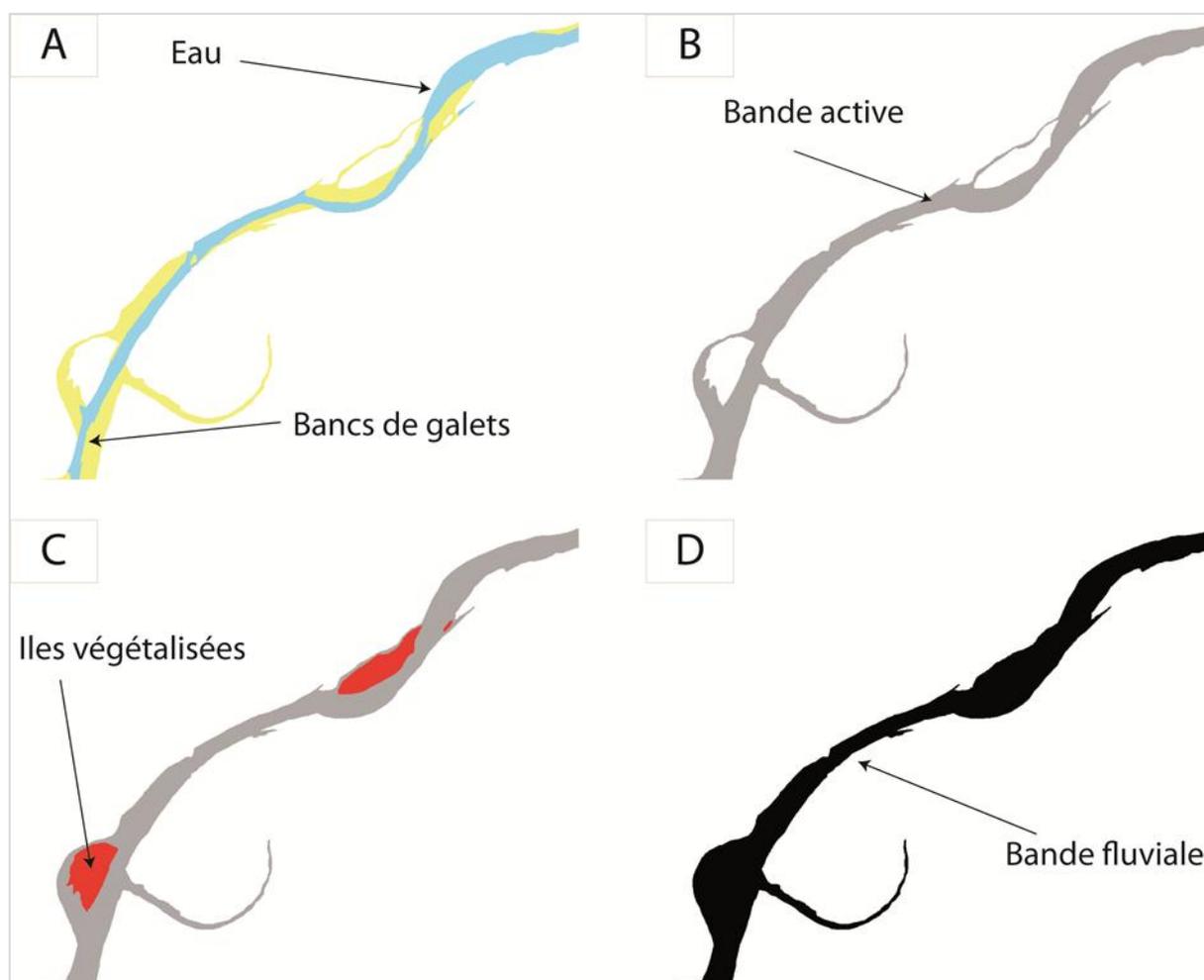


Figure 2.5. Illustration des polygones « eau » et « bancs de galets » (A) permettant la construction de la bande active (B). Identification des îles végétalisées (C) et construction de la bande fluviale (D).

Tableau 2.1. Règles de fusion des polygones « bancs », « eau » et « eau + bancs » pour créer les polygones « Chenal à galets » et « Chenal en eau ». (1 : présence / 0 : absence).

Bancs	Eau	Eau + bancs	Type de chenal
1	0	0	à galets
1	1	0	à galets
1	1	1	à galets
0	0	1	à galets
0	1	1	à galets
0	1	0	en eau

Les couches vectorielles surfaciques utilisées sont le chenal en eau, la bande active et la bande fluviale. Il ne s'agit pas de données brutes à proprement parler. En effet, chacune de ces couches a été préalablement travaillée. L'information brute est obtenue directement des bases de données de l'IGN, mais la laisser telle qu'elle n'est pas pertinent pour notre étude. La **bande active** est le résultat de l'union des polygones « eau » et « bancs de galets ». La **bande fluviale** correspond à la bande active dont les îles végétalisées se situent à l'intérieur. Pour sa construction, nous avons utilisé l'outil « *clean gaps* » d'ET Geowizards, dont la fonction est de remplir les espaces vides situés à l'intérieur du polygone de bande active. La fusion de ces « espaces vides » avec le polygone « bande active » permet la création d'une nouvelle couche, appelée la bande fluviale (Figure 2.5). La couche vectorielle représentant le fond de vallée a également été utilisée (Alber et Piégay, 2008). Le linéaire de la bande active est une « combinaison » de la couche « Hydro » de la BD Carthage et de la couche « Tronçon » de la BD Topo®.

L'intersection de la couche polygone représentant le « chenal en eau » et le « chenal à galets » avec la polyligne du nouveau linéaire permet d'obtenir les informations suivantes (Figure 2.6):

- ✓ le « chenal en eau », représentant 17% du réseau hydrographique, soit 8 042 km,
- ✓ le « chenal à galets », représentant 11% du réseau, soit 5 180 km,
- ✓ et le « non visible », il s'agit des polygones n'intersectant pas de polygones. Ce sont principalement des secteurs où la bande active est seulement schématisée par une polyligne sur la BD Topo® et non pas représentée dans sa réalité géographique.

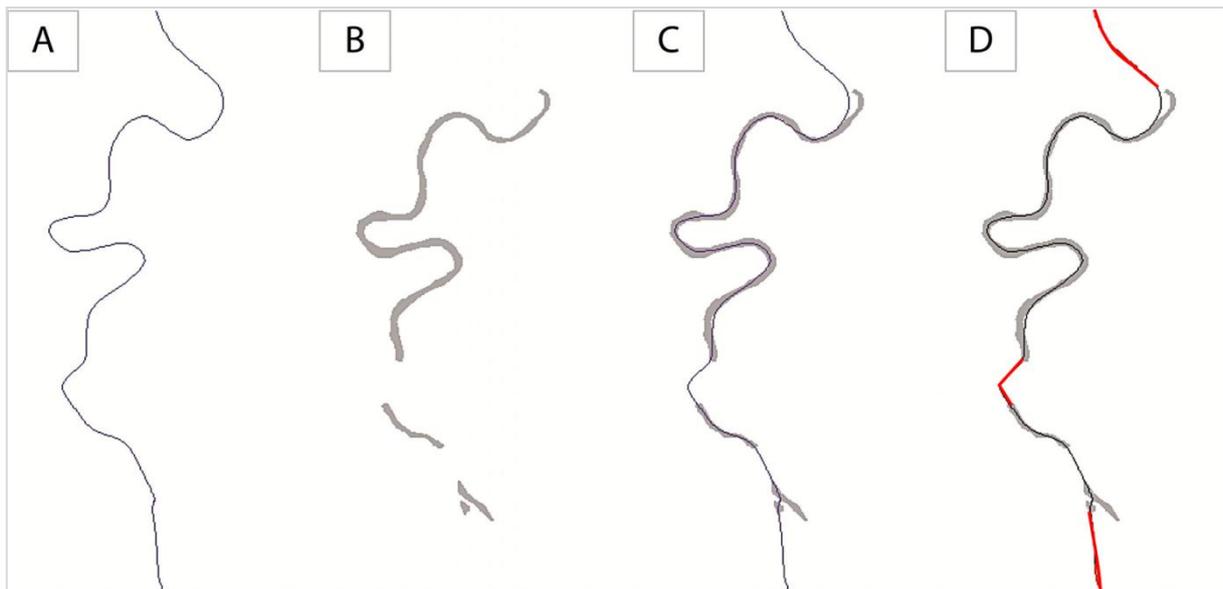


Figure 2.6. Illustration du linéaire (A) et des polygones (B) à intersecter (C). Présentation du linéaire avec les secteurs intitulés « non visible » en rouge (D).

Dans ce cas, l'information surfacique concernant la bande active, n'a pas été détectée. Ce linéaire avec une longueur d'environ 34 000 km représente plus de 72% du réseau hydrographique.

2. Au sein du fond de vallée à partir de données *rasters*

2.1. Objectif : vectoriser la bande naturelle

La caractérisation du réseau hydrographique passe par l'analyse de la bande naturelle, celle-ci est composée de trois éléments principaux : le chenal en eau, les bancs de sédiments et la végétation riveraine. L'identification de ces différents objets est une phase essentielle nécessitant la mise en place d'un protocole d'extraction sous forme vectorielle des classes eau, végétation et bancs de galets. Ce qui est présenté ci-dessous correspond aux tests que nous avons effectués sur la Drôme.

2.2. Rappel des différentes méthodes de classification des images

Pour extraire de manière automatique ces différentes classes d'occupation des sols, une technique de classification a été utilisée. Elle consiste à assembler les pixels d'une image pour former des classes ayant des caractères communs (Minvielle et Souiah, 2003). On identifie quatre méthodes de classification (Tableau 2.2).

La procédure peut différer selon le niveau d'implication de l'opérateur pour mettre en place la classification. La classification dite non-supervisée correspond à une procédure automatique, où l'opérateur n'utilise aucune information externe. Pour la classification supervisée, l'opérateur, en se servant de ses connaissances du secteur étudié, identifie des zones d'apprentissages représentatives des classes. Lorsque ces deux techniques sont combinées, on parle alors de procédure hybride (Wiederkehr et al., 2009).

La méthode orientée-objet est apparue comme étant la technique la plus appropriée pour obtenir une discrimination drastique des objets. C'est la méthode qui donne les résultats les plus semblables à ceux qui seraient obtenus par une technique visuelle de reconnaissance des objets. En effet, en plus des paramètres classiques (valeur radiométrique), cette méthode utilise des paramètres de texture et de forme pour distinguer les classes entre elles. Par rapport à la photo-interprétation, cette méthode permet l'automatisation de la procédure. Il y a donc un gain de temps.

Tableau 2.2. Présentation succincte des différentes méthodes de classification.

	Classification par photo-interprétation	Classification par pixel	Classification par zonage	Classification orientée-objet
Principe	Regroupement manuel de chaque classe	Attribution pour chaque pixel d'une classe selon ses valeurs radiométriques, indépendamment des pixels voisins	Se base sur la classification par pixel avec en sus l'introduction de l'approche spatiale	Segmentation : identification des objets composés de plusieurs pixels Classification : regroupement en classes des objets ayant la même structure de données
Conséquences pour une application à large échelle	Méthode très subjective dépendant de l'opérateur. Méthode lourde et lente à mettre en place à l'échelle du réseau.	Risque de confusion entre certaines classes (eau, végétation) dont les valeurs radiométriques sont semblables	Risque de confusion moindre que l'approche par pixel mais risque toujours existant	L'objet n'est pas seulement caractérisé par sa valeur radiométrique, il l'est également par sa forme, sa texture et son contexte

2.3. Procédure d'extraction des objets par méthode orientée-objet

Trois classes d'objets (Figure 2.7) composant le corridor alluvial (eau, bancs de galets et végétation riveraine) ont été extraites sous forme vectorielle à partir des images du fond de vallée en utilisant une classification orientée-objet (module « *Feature Extraction* », logiciel ENVI) ; l'objet a été décrit non seulement par sa valeur radiométrique mais également par sa forme, sa texture et son contexte, ce qui peut être un complément important dans le cas d'utilisation d'images à faible résolution spectrale. La classification orientée-objet a été décomposée en deux étapes (Perez Correa, 2004 ; Wong et al., 2003) :

- ✓ la première correspond à la **segmentation** de l'image. L'algorithme permet l'identification *a priori* des objets-images composés de plusieurs pixels,
- ✓ la deuxième est l'étape de **classification** *stricto sensu*. C'est au cours de cette phase que les objets, dont la structure des données et le comportement spectral sont homogènes, sont regroupés en classes.

La fonction d'extraction utilisée repose sur une logique floue, c'est-à-dire que le classificateur a attribué à chaque objet une classe en fonction du degré d'appartenance (ou de probabilité) à chacune d'elles (Thomas, 2005).

2.3.1. Segmentation de l'image

Pour subdiviser l'image en région homogène, le logiciel ENVI EX décompose l'étape de segmentation en trois sous-étapes. Dans chaque cas, des tests visuels ont été effectués afin d'identifier les seuils de meilleure segmentation (Wiederkehr et al., 2010b).

- ✓ La première sous-étape a été l'**ajustement du niveau d'échelle** pour délimiter les frontières des objets et la taille des zones homogènes. Ce paramètre joue sur la finesse de la segmentation : plus l'échelle est grande, plus les régions sont étendues. Il s'agit du paramètre le plus important à prendre en compte pour ce travail. Nous avons opté pour un niveau de 40 sur un total de 100.
- ✓ La seconde sous-étape a été le paramétrage du **niveau de fusion des objets**. Elle a permis de résoudre la question de la sur-segmentation de l'image, en regroupant les objets contigus présentant des valeurs radiométriques quasi identiques. Nous avons choisi un niveau de 96 sur 100.
- ✓ La troisième sous-étape a permis d'affiner la segmentation ; cette étape repose sur un seuillage autorisant le regroupement des segments adjacents ayant une luminosité similaire. Dans notre cas, les tests effectués lors de cette étape n'ont montré aucun gain significatif. C'est pourquoi nous avons conservé les paramètres par défaut.

2.3.2. Classification de l'image

Pour identifier les paramètres les plus discriminants et pour définir les seuils des classes, on a procédé en trois étapes.

1. Création d'un jeu de données de référence par photo-interprétation, assimilable à des données terrain, la nature des polygones étant interprétée

L'objectif de cette sous-étape est de créer un jeu de données pour attribuer une classe à chaque objet défini par la segmentation. Le résultat de la photo-interprétation donne un jeu de données composé de 1 000 polygones (364 bancs de galets, 268 zones en eau et 368 taches de végétation riveraine) sur quatre zones tests (Wiederkehr et al., 2010b). Chacune se situe sur une dalle différente des autres afin d'avoir plusieurs gammes spectrales et des largeurs de bande active différentes. Pour chacun des objets, on extrait en plus, les valeurs des différentes variables. Elles sont une trentaine et couvrent les champs spectraux, texturaux et de formes dans les différents canaux. La classification se fait sur une base de trois classes représentant la bande naturelle : eau, sédiments et végétation.

2. Détermination des paramètres discriminants

Cette sous-étape consiste à sélectionner les métriques et les seuils (Tableau 2.3) qui discriminent le mieux des classes de polygones au sein du jeu de données créé précédemment et en s'appuyant sur un arbre de segmentation (logiciel SPSS[®]) (Wiederkehr et al., 2010b).

Tableau 2.3. Présentation des métriques retenues pour la classification.

Paramètres		Bancs de galets	Eau	Végétation
Forme	Superficie	X	X	X
	Moyenne - bande 1	X	X	
Spectral	Moyenne - bande 3	X	X	X
	Écart-type - bande 2		X	X
Texture	Taux moyen	X		X

3. Classification « experte »

Il s'agit d'appliquer la classification, en définissant les nouvelles fonctions d'appartenance qui respectent les seuils définis à l'étape précédente. Afin d'améliorer le résultat, un nettoyage manuel de la zone classée a été effectué. Nous avons lancé la classification sur deux sites expérimentaux (Wiederkehr et al., 2010b).

2.3.3. Validation quantitative de la classification

L'évaluation d'une classification dépend des exigences fixées au départ. En effet, plus on cherche à obtenir une classification robuste pour éviter les retouches, plus on attachera de l'importance à la qualité des résultats de l'évaluation. Pour évaluer une classification, on utilise des outils statistiques et en particulier la matrice de confusion (Caloz et Collet, 2001). Ce tableau à double entrée permet d'identifier deux types d'erreurs que peuvent commettre les classificateurs (ainsi appelés les algorithmes de classification) (Caloz et Collet, 2001) : d'une part, l'erreur de commission (*user's accuracy*), lorsque le classificateur n'a pas affecté les objets à la bonne classe et, d'autre part, l'erreur d'omission (*producer's accuracy*), qui rend compte du non-classement des objets. L'algorithme peut incorrectement exclure des pixels d'une classe. On qualifie la qualité de la classification par un indice global, qui sert à exprimer de manière synthétique le résultat de la classification mais l'indice créé ne prend pas en compte les pixels non classés. Il s'agit du rapport des pixels bien classés sur la totalité des pixels classés (à l'exclusion donc des pixels non classés). À la place des pixels, on peut utiliser la surface en mètres carrés.

Nous avons lancé la classification sur deux sites expérimentaux. Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats d'une classification manuelle par le biais d'une matrice de confusion (Tableau 2.4). Les résultats montrent que de manière générale, 80% de la surface a été correctement classée. Mais l'observation détaillée de ces résultats indique que les bancs de galets et les taches de végétation ont enregistré des taux de classement relativement élevés alors que pour l'eau, près d'un polygone sur deux n'a pas été correctement identifié, la confusion étant faite avec certaines zones de culture (Wiederkehr et al., 2010b).

Tableau 2.4. Matrice de confusion de la classification.

		Observation			
		Bancs de galets	Eau	Végétation	Total (en m ²)
Prédiction	Bancs de galets	415 485	6 040	8 925	430 450
	Eau	55 232	322 880	66 880	444 992
	Végétation	19 560	321 083	1 211 414	1 552 057
	Total (en m ²)	490 277	650 003	1 287 219	2 427 499
	Erreur d'omission	84,70%	49,70%	94,10%	
	Erreur de commission	96,50%	72,60%	78,10%	
Taux de classement général		80,30%			

Erreur d'omission : indicateur de non-classement des objets. Le classificateur exclut incorrectement des objets d'une classe.

Erreur de commission : indicateur d'une mauvaise affectation de classes par classificateur.

Extraction des objets par méthode orientée objet

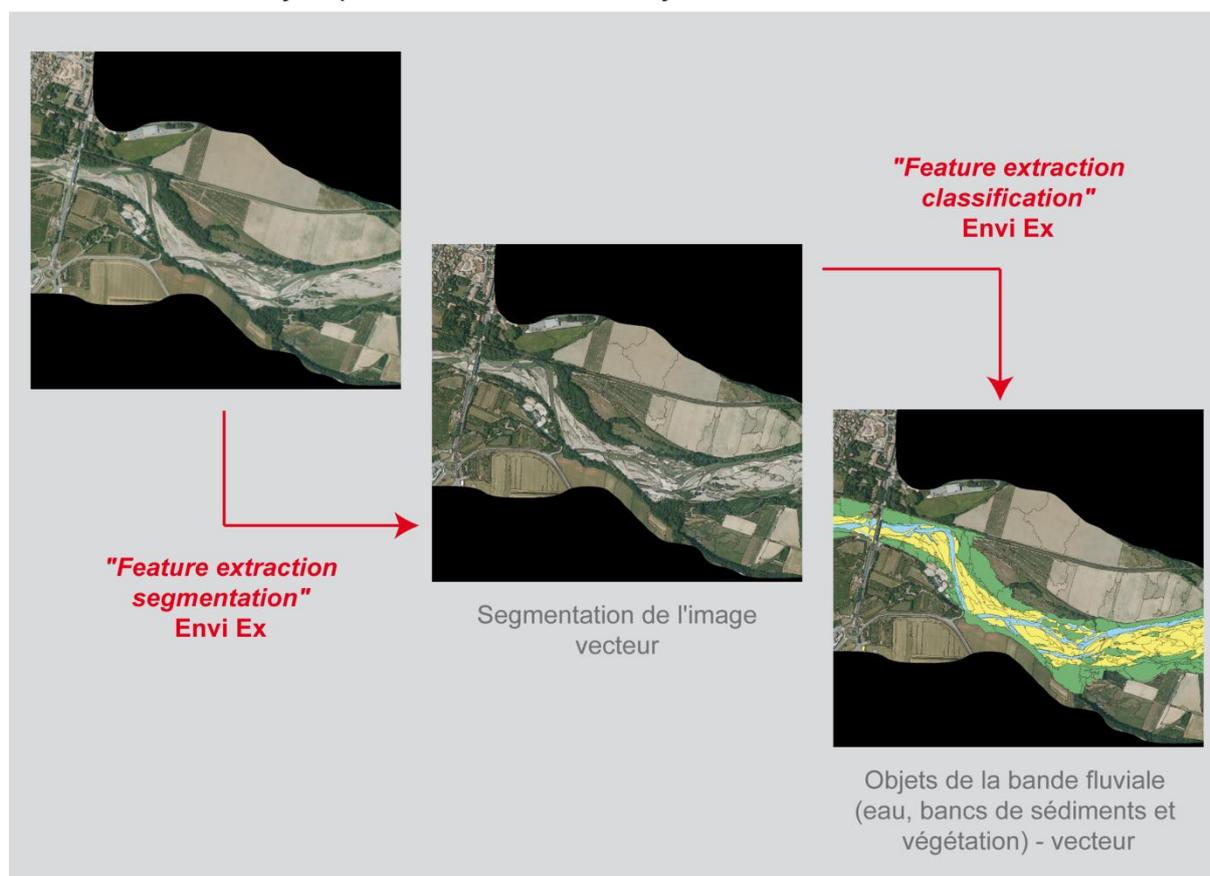


Figure 2.7. Extraction des objets composant la bande fluviale à partir d'une méthode orientée-objet.

2.4. Problèmes pouvant influencer la qualité de la détection des objets

La qualité d'identification de certains objets n'est pas la même dans l'espace et dans le temps (effet des saisons, effet des débits). En fonction de la date à laquelle est prise le cliché, il ne sera pas toujours aussi évident d'en extraire toutes les informations théoriquement disponibles. Dans la partie amont du réseau, une faible largeur du chenal devient un facteur limitant pour extraire cet objet et donc pour renseigner tous les indicateurs qui en découlent. Le même problème est rencontré lorsque la canopée dense masque le chenal. En effet, les houppiers des arbres de berge viennent recouvrir le chenal en eau. Toutefois, si la bande active est étroite, mais sans végétation arborescente riveraine, l'extraction des objets est possible. Les ombres portées (Figure 2.8) causent deux types de problèmes. D'une part, le chenal en eau se confond avec la végétation lors de l'extraction des objets. D'autre part, lors de l'extraction de métriques au sein du chenal, les valeurs radiométriques calculées peuvent être biaisées. En effet, le phénomène d'ombrage affaiblit les valeurs radiométriques moyennes de l'objet. Il faut donc faire attention de ne pas confondre l'ombre avec un lit profond, qui aurait pourtant des valeurs radiométriques semblables.



Figure 2.8. Illustrations de l'ombre portée (A) et de l'étroitesse du chenal (B).

De même, les informations (Tableau 2.5) liées aux bancs de galets, comme leur granulométrie ou leur taille, ne pourront pas être obtenues dans la partie aval du réseau où la géométrie du chenal se traduit souvent par l'absence de bancs émergés visibles.

Tableau 2.5. Exemples de conditions nécessaires à une bonne identification des objets.

Objet	Conditions
Bancs de galets non végétalisés	Extension variable en fonction du débit et de la canopée de la végétation riveraine
Chenal en eau	
Ouvrages longitudinaux (digues)	Ne doivent pas être recouverts de végétation
Ouvrages transversaux (épis, barrages, seuil)	Inférieur au débit à plein bord pour les petits ouvrages
Type de fond (végétation aquatique, sédiments, ...)	Clarté de l'eau au moment de l'acquisition
Végétation (espèces végétales, mature, pionnière)	Tenir compte des périodes phénologiques
Zones humanisées (habitats, cultures, industries)	

C. Création d'unités spatiales

1. Objectif: mettre en place une unité de base pour l'analyse spatiale

L'objectif à terme est de caractériser la qualité physique des cours d'eau sur le bassin RMC et donc de réaliser une analyse spatiale de l'état des masses d'eau superficielles à l'échelle du bassin. Pour y parvenir, nous avons conçu des indicateurs à partir de métriques issues de la bande fluviale. L'extraction de celles-ci nécessite la mise en place d'unités dans lesquelles seront retirées des données. Chaque unité sera dotée d'une information sémantique mais également d'une indication de localisation d'où l'emploi du terme d'unités spatiales. Comme le définissent Pumain et Saint-Julien (2010), l'unité spatiale représente une cellule de base d'une grille à laquelle est associée une information sémantique en vue d'effectuer une analyse spatiale.

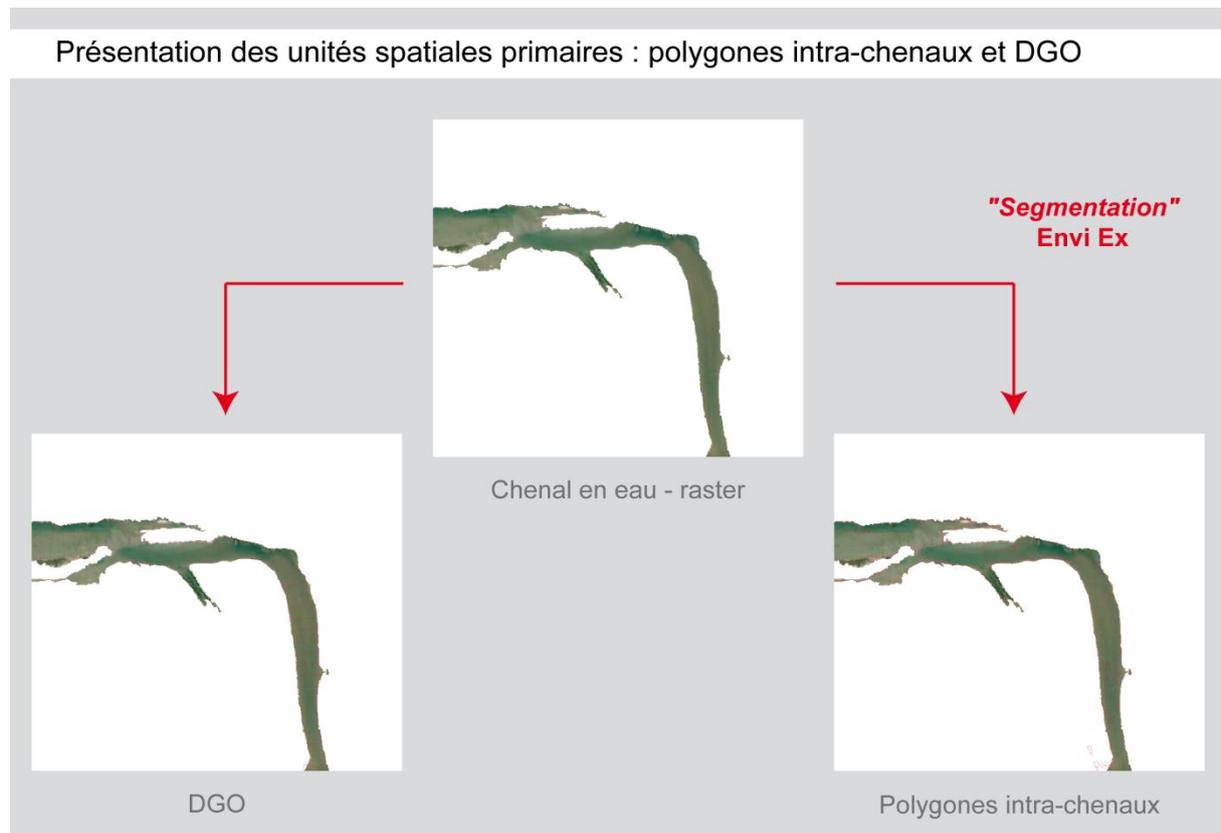


Figure 2.9. Illustration des unités spatiales primaires.

Trois types d'unités spatiales sont utilisés dans cette thèse (Figure 2.9).

- ✓ Les **polygones intra-chenaux**, qui sont des objets se rapprochant de la réalité géographique. Ils permettent d'avoir une notion de la représentation spatiale et thématique de l'objet.

- ✓ Les **objets géographiques désagrégés** (ou DGO pour *Disaggregated Geographic Object*), qui sont des unités spatiales artificielles créées pour mettre en œuvre certains traitements de caractérisation du fait de leurs propriétés spatiales (distribution longitudinale selon un pas de distance donnée, équi-longueur) (Alber et Piégay, 2011)(Figure 2.10).
- ✓ Les **objets géographiques réagrégés** (ou AGO pour *Agregated Geographic Object*) qui sont construits dans un deuxième temps.

Les polygones intra-chenaux et les DGO peuvent être assimilables à des unités spatiales primaires. Ces unités serviront à extraire des métriques radiométriques (à partir de couche rasterisée) ou géométriques (à partir de couche vectorielle).

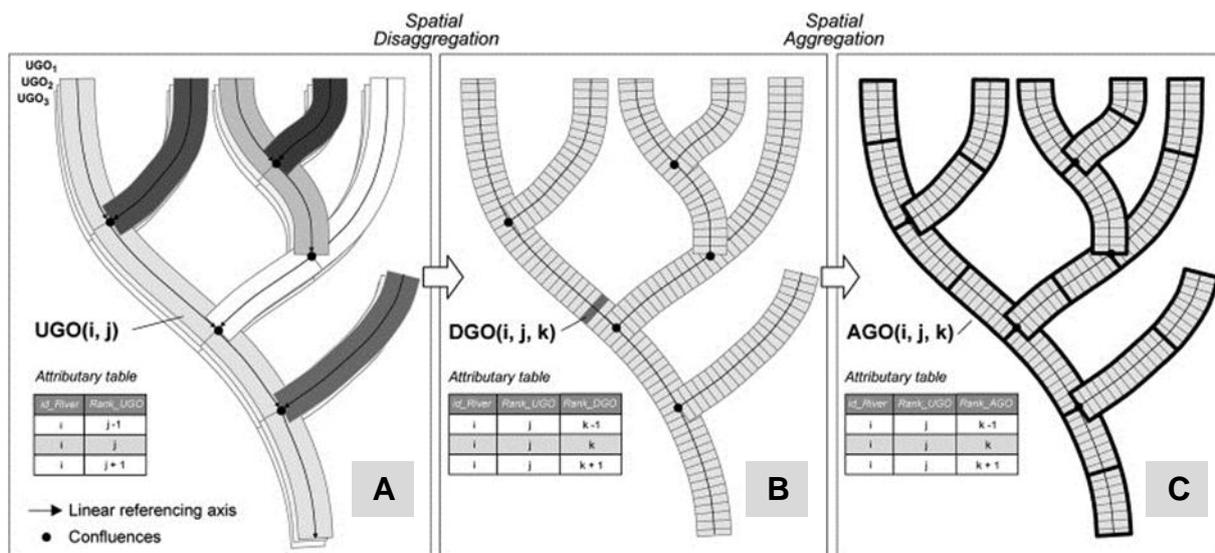


Figure 2.10. Définition des unités spatiales génériques et l'axe de référence linéaire pour la caractérisation des objets géographiques à l'échelle du réseau (Alber et Piégay, 2011).

A : Objets élémentaires – B : Objets Géographiques désagrégés – C : Objets Géographiques réagrégés.

2. Unités spatiales extraites des données vectorielles : les objets géographiques désagrégés (DGO)

Des objets géographiques désagrégés ont également été utilisés dans ce cas comme des unités spatiales standardisées. Ils ne correspondent pas exactement à une réalité géomorphologique mais constituent des unités intermédiaires de traitement (Wiederkehr et al., 2010c). Nous présentons ci-dessous un exemple de construction de DGO à partir de la bande active sur la Drôme. Il faut procéder de la même manière pour les DGO créés à partir du chenal en eau ou d'autres objets issus du corridor fluvial (Figure 2.11).

1. Segmentation de l'axe médian de la bande active

Nous partons d'un polygone représentant la bande active. Ce polygone est né de l'union des polygones « eau » et des « bancs de galets ». Un axe médian est créé à partir de ce polygone en utilisant la fonction « *Centerlines* » d'ArcInfo. Cet axe est segmenté de manière régulière (tous les 10 ou 100 m) en utilisant la fonction « *Split Polyline* » d'ET Geowizard (module additionnel

d'ArcGis). Une fois découpée, cette ligne est convertie en points à l'aide de la fonction « *Convert polyline to point* ».

Construction des objets géographiques désagrégés (DGO)

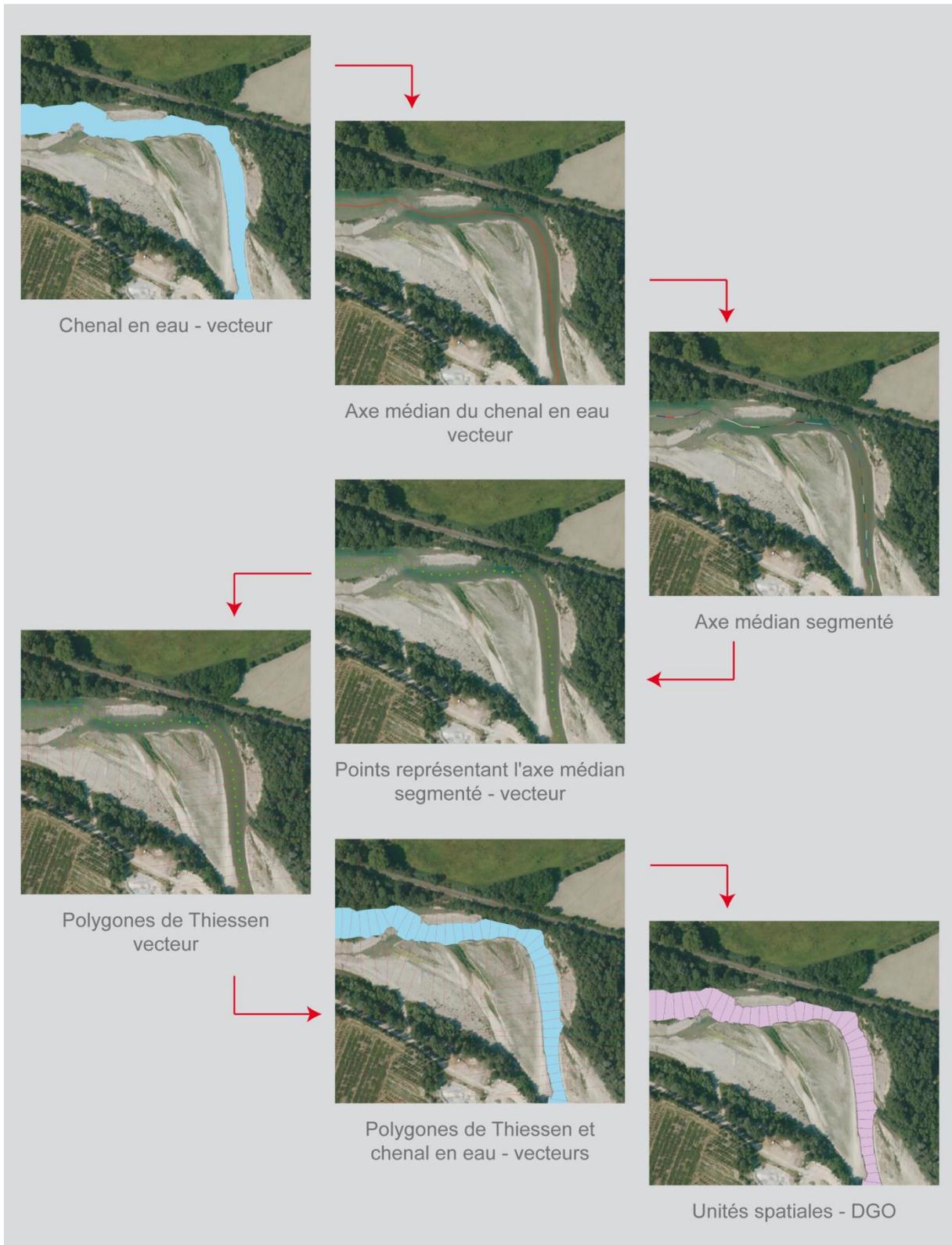


Figure 2.11. Présentation des étapes de construction des objets géographiques désagrégés (DGO).

2. Polygonisation de Thiessen

La couche vectorielle point créée précédemment est utilisée avec l'outil « *polygonisation de Thiessen* » pour construire des polygones à partir des bissectrices perpendiculaires aux lignes reliant deux points voisins (Thiessen et Alter, 1911).

3. Création des objets géographiques désagrégés

Les polygones de Thiessen ainsi construits sont « *intersectés* » avec l'outil du même nom au polygone de la bande active, ce qui crée des objets géographiques désagrégés.

3. Unités spatiales extraites des données *rasters* : les polygones intra-chenaux

Les polygones intra-chenaux (Figure 2.12) sont des unités homogènes, regroupant des pixels de même valeur radiométrique construits à l'intérieur de l'objet eau. Les polygones de segmentation sont construits à partir d'un algorithme orientée-objet et, plus particulièrement à partir de l'étape de segmentation. Dans cette thèse, seul le chenal en eau a été segmenté. Mais il est tout à fait envisageable de procéder de la même manière avec des polygones d'autres natures. Les polygones intra-végétation pourraient servir à distinguer différentes communautés ou espèces végétales (Dufour et al., Soumis). La construction des polygones intra-chenaux a nécessité l'utilisation du module d'extraction d'ENVI EX et le paramétrage des trois critères de segmentation (Wiederkehr et al., 2010b). La définition des seuils de chaque paramètre s'est faite par une méthode visuelle au pas à pas.

4. Unités spatiales réagrégées

Les DGO ne correspondent pas à une réalité géographique. Mais ils apportent une information « sur-segmentée » par rapport à l'échelle géographique à laquelle s'expriment les formes fluviales qui nous intéressent et peuvent ensuite être agrégées pour y faire émerger ces formes. Cette agrégation se fera par des tests statistiques réalisés sur une métrique afin de se rapprocher au plus de la réalité géographique.

Le test statistique employé dans cette thèse est le test de Pettitt (Pettitt, 1979). Il permet d'identifier des sous-segments homogènes en moyenne au sein d'une série de valeurs. Il s'agit d'un test non paramétrique qui est une variante du test de Mann-Whitney, conçue à l'origine pour deux échantillons distincts. La statistique U_d, N suppose que pour chaque distance d avec une valeur entre 1 et N , les deux séquences longitudinales (X_i et X_j) pour $i = 1$ à d et pour $j = d + 1$ à N appartiennent à la même population. La variable qui doit être testée est le maximum, en valeur absolue, de la variable U_d, N . Ce test est ainsi appliqué ici pour identifier des tronçons homogènes en moyenne en termes de largeur de bande active et de largeur de fond de vallée.

Création des unités spatiales : polygones intra-chenaux, objets géographiques agrégés et désagrégés

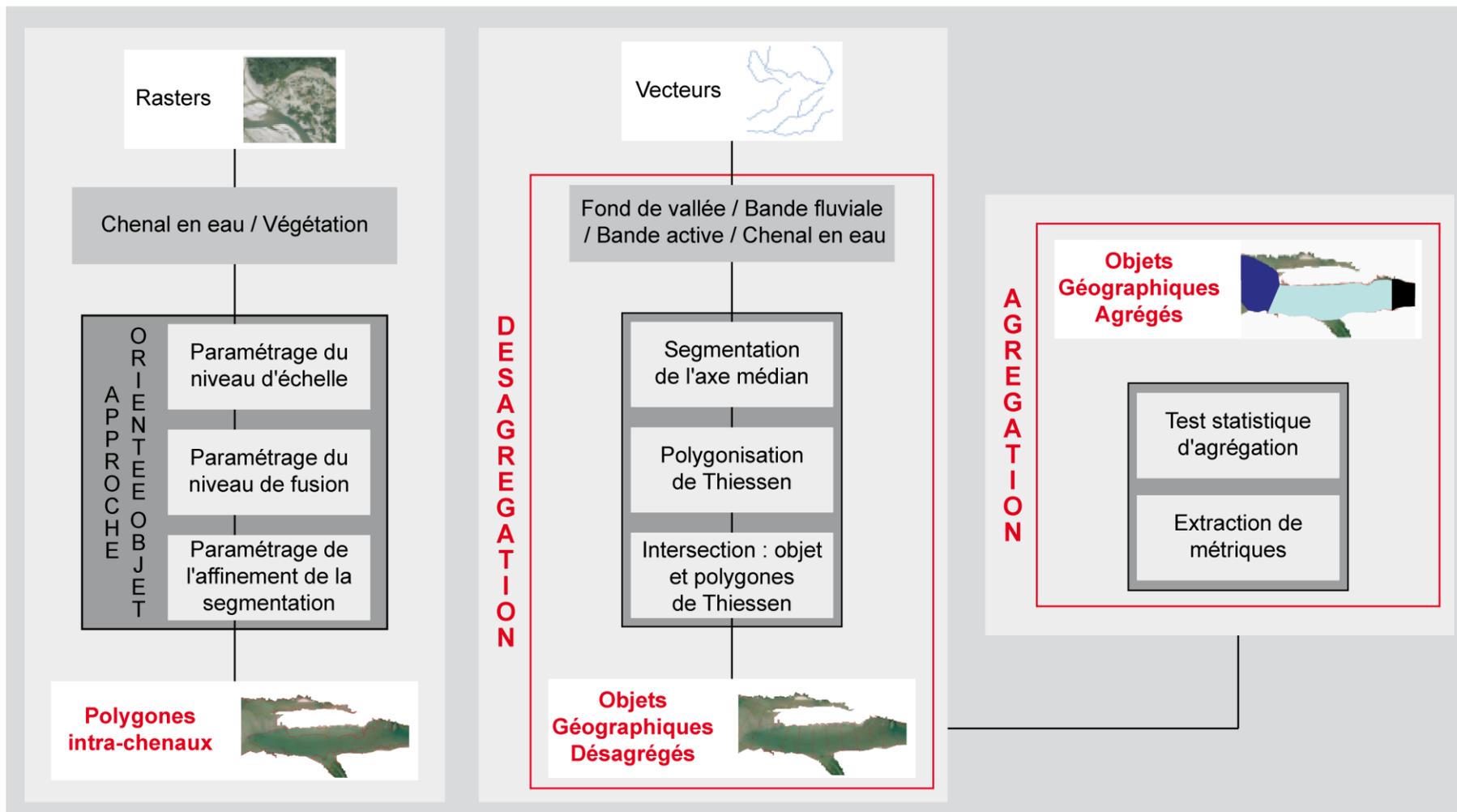


Figure 2.12. Présentation de la méthode permettant de créer les unités spatiales à partir des données brutes.

D. Extraction de métriques

Une fois les unités spatiales définies, une liste de métriques quantitatives ou de paramètres qualitatifs peut être dressée (Tableau 2.8). On entend par métriques, l'ensemble de mesures opérées par unité spatiale. Ces métriques seront utilisées pour élaborer des indicateurs de suivi ou d'état par segments élémentaires. Elles sont extraites de manière semi-automatique et se classent en plusieurs types :

- ✓ les **métriques brutes** extraites directement par unité spatiale,
- ✓ les **métriques synthétiques** issues de la combinaison soit de plusieurs métriques brutes, soit de plusieurs objets élémentaires,
- ✓ les **métriques structurales**, qui sont illustratives d'une structure spatiale,
- ✓ les **métriques temporelles** : lorsque plusieurs dates sont disponibles. Celles-ci seront peu abordées dans cette thèse.

1. Caractérisation des objets élémentaires par des métriques brutes

Les objets identifiés peuvent être caractérisés à partir de la géométrie de l'entité, de sa relation avec les autres objets ou en fonction de ses données spectrales (Tableau 2.6). Cette étape permet de préciser la nature de l'objet ou de quantifier un paramètre localement.

1.1. Métriques issues des données vectorielles

Robin (1995) évoque deux types de métriques permettant la caractérisation d'un objet vectoriel.

- ✓ Les métriques **géométriques** (Figure 2.13) comme la largeur, la longueur, le périmètre, la surface, la position ou l'orientation de l'unité spatiale. Ces métriques se calculent à partir des données vectorielles en utilisant les outils ArcGis ou les modules supplémentaires de ET Geowizard, comme « *Polygons Characteristics* ». Ces métriques se recensent principalement à partir des polygones intra-chenaux.
- ✓ Les métriques **topologiques** comme la présence ou l'absence de relation, l'intersection, l'inclusion ou l'égalité. Les opérateurs spatiaux topologiques (Champoux et Bedard, 1992) mettent en évidence l'existence de trois types de relation : inclure, toucher, adjacent. On peut par exemple mesurer les contacts eau / bancs de galets pour définir des niveaux d'écotone.

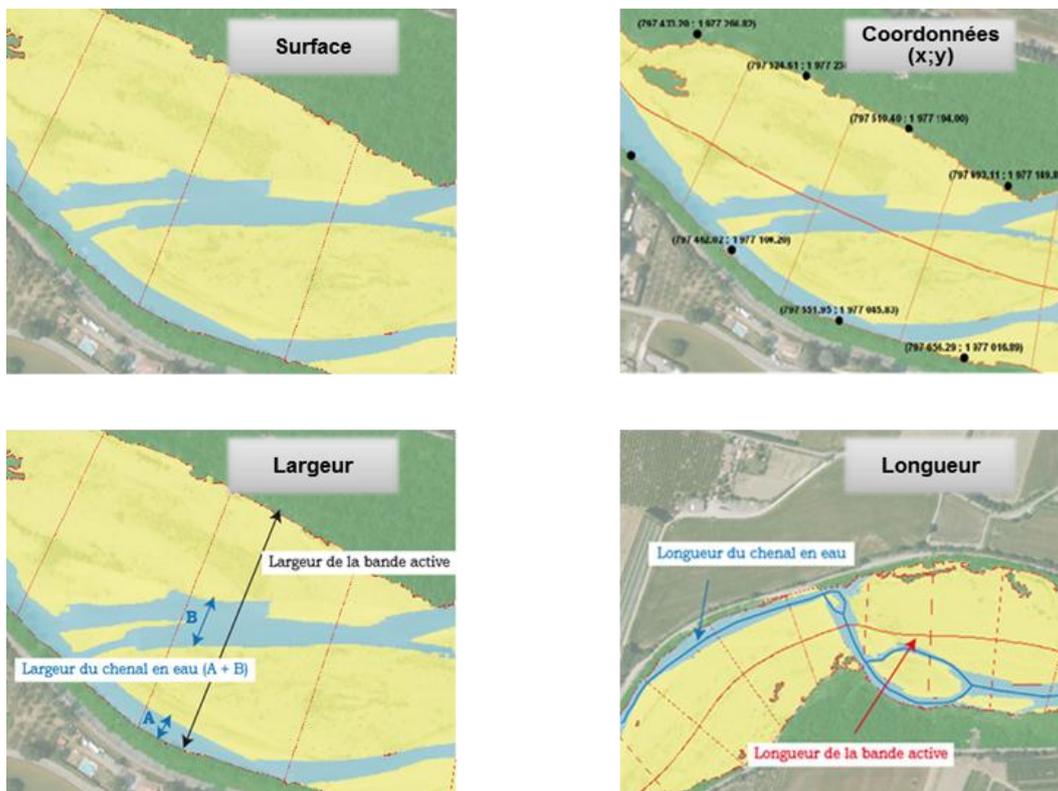


Figure 2.13. Exemple de métriques issues de données vectorielles extraites par DGO : calcul de la surface, extraction des coordonnées géographiques extraites par rives, calcul de la largeur, calcul de la longueur.

Tableau 2.6. Présentation des différentes métriques pouvant être extraites par unité spatiale.

Objets	Unités spatiales		Support		Métriques radiométriques	Métriques géométriques			Coordonnées (x ; y)
	10 m	100 m	Raster	Vecteur	Valeurs radiométriques**	Largeur	Longueur	Surface	
Eau*		X		X			X	X	
Bancs de galets		X		X			X	X	
Végétation		X	X	X	X	X	X	X	
Chenal principal*	X		X	X	X	X	X		
Bande active		X				X	X	X	X
Outils utilisés					ArcMap - statistiques zonales	ArcMap - Calculer la géométrie		ArcMap - les coordonnées X ; Y	

* On distingue le chenal principal de la classe eau, qui représente le chenal principal et les bras secondaires.

** Les métriques radiométriques regroupent toutes les métriques mesurées à partir des valeurs des pixels, mais aussi de l'agencement des pixels entre eux (forme, taille, ...).

1.2. Métriques issues des données matricielles

Les métriques issues des données *rasters* se mesurent en fonction de la valeur des pixels. Selon Robin (1995), il existe six informations (Figure 2.14) accessibles sur un objet : la couleur (ou niveau de gris), le contraste, la taille, l'orientation, la texture et la forme. La détermination de ces métriques peut se faire soit à l'aide de la boîte à outils « *Statistiques zonales* » d'ArcGis, soit en utilisant des logiciels de traitement de l'image comme ENVI.

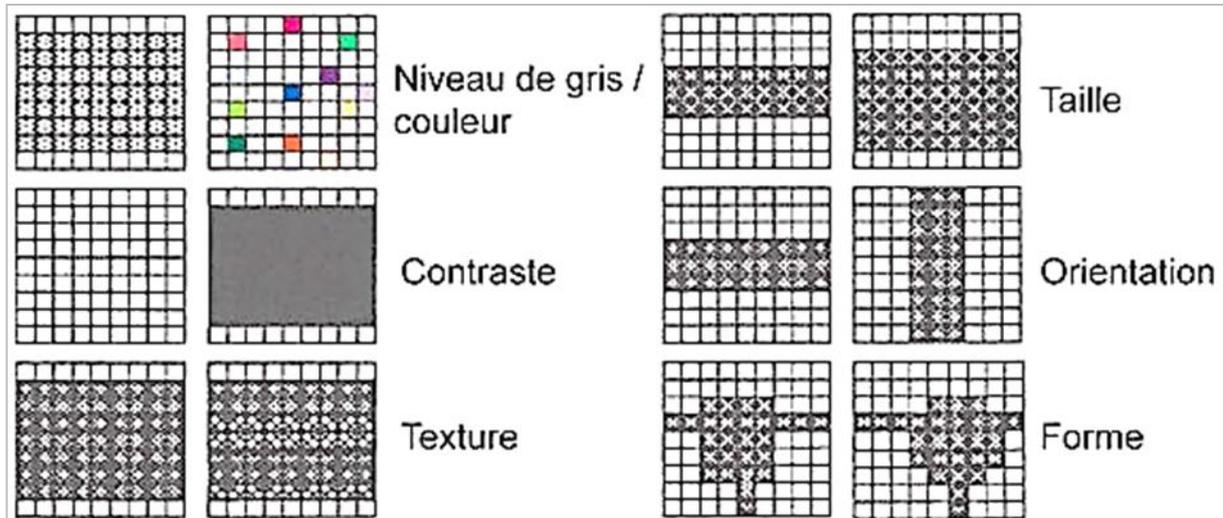


Figure 2.14. Les six informations accessibles sur un objet (Lejot et Piégay (2008) d'après Robin (1995)).

Ces métriques (Figure 2.15) peuvent être extraites à partir de n'importe quels types d'unités spatiales.

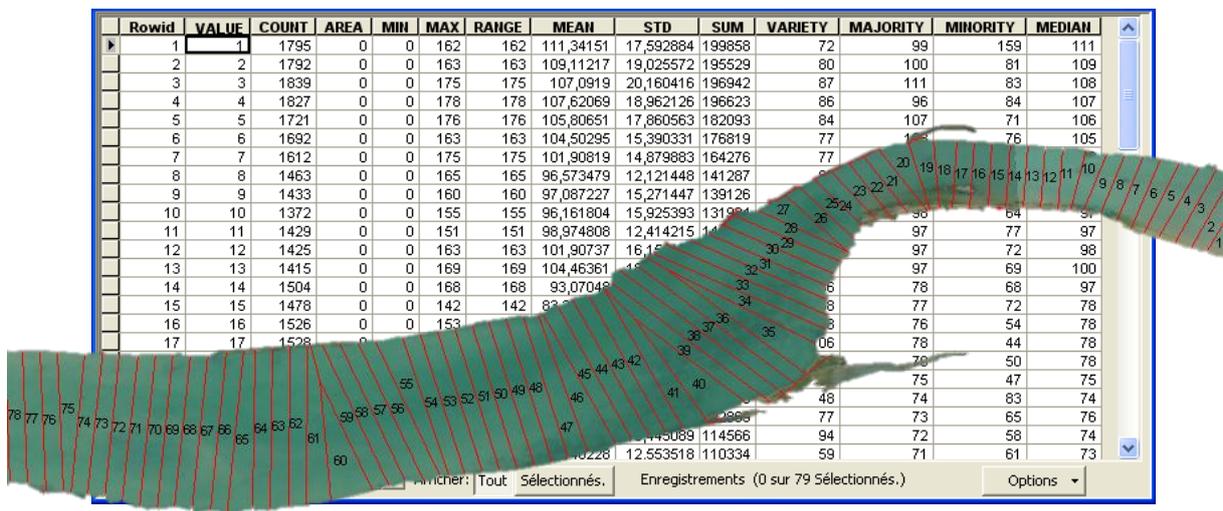


Figure 2.15. Illustration des métriques issues des données matricielles pouvant être extraites avec ArcGis.

2. Construction de métriques synthétiques par agrégation spatiale

Dans ce cas, la métrique est renseignée par la combinaison de plusieurs métriques brutes (largeur, surface, ...) ou de plusieurs objets à une échelle spatiale plus vaste, comme l'indice de sinuosité (le rapport entre la longueur de la bande active et la longueur à vol d'oiseau) ou le taux de confinement (le rapport entre la largeur de la bande active et la largeur du fond de vallée).

3. Extraction d'une structure spatiale par les métriques structurales

Les indicateurs construits à partir des métriques structurales permettent de mettre en valeur les différentes structures qui s'expriment le long d'un continuum. La détection de ces structures peut se faire de deux façons : soit par détection de rupture, soit en analysant le signal. Ces métriques servent à présenter les variations ou évolution d'un type de données le long d'un linéaire, de détecter des organisations spatiales. On peut par exemple :

- ✓ étudier la largeur de la bande active de l'amont vers l'aval et ainsi détecter les zones où la bande active est étroite, ce qui peut être synonyme d'anthropisation (endiguement).
- ✓ observer les secteurs où la texture de la végétation est plus prononcée, faisant apparaître des zones à végétation potentiellement invasive.

On caractérise donc la structure longitudinale du signal en détectant la variabilité de l'information, sa régularité ou sa répétitivité, mais également ses maxima et minima locaux. On observe l'information de manière globale, sur l'ensemble du réseau de l'amont vers l'aval.

3.1. ... par détection de rupture

Le test statistique de Pettitt est utilisé pour détecter les ruptures à l'intérieur du signal, autrement dit il sert à faire un seuillage de l'information (Renard, 2006).

3.2. ... par analyse du signal²

Un signal se définit généralement comme une entité véhiculant une information et ce, dans n'importe quel domaine. Il peut s'agir d'une onde acoustique transmettant une information musicale, ou d'une onde lumineuse transmettant de la lumière. Autrement dit, le signal représente la description mathématique d'une onde, d'une impulsion ou de toute autre séquence, permettant de voir l'intensité d'un phénomène en fonction d'une ou plusieurs variables indépendantes, comme le temps, la température ou la distance. La simple observation de ce signal permet de

² Cette partie est tirée des publications suivantes : (Burke Hubbard, 2000 ; Demayer et al., 2003 ; Grossmann and Torresani, 1998 ; Quinquis, 2007 ; Rioul, 2005)

relever son début, sa fin, et ses variations, mais elle ne permet pas d'identifier ses périodicités³ (ses fréquences⁴).

Un signal peut se classer de différentes manières :

- ✓ la classification dimensionnelle : qui dépend du nombre de variables.
- ✓ la classification phénoménologique : en fonction du caractère déterministe (pouvant être prédit par un modèle mathématique) ou aléatoire du signal.
- ✓ la classification morphologique.

Le **traitement d'un signal** est la procédure permettant d'extraire l'information, de la traiter pour, *in fine* permettre la reconnaissance des formes composant le signal afin de l'interpréter. La simplification du signal passe par sa décomposition en une somme de fonctions basiques (sinus, ou cosinus) c'est-à-dire en une somme de sinusoides simples. La somme de toutes les ondes forme l'onde totale (Figure 2.16). Le signal se caractérise par l'ensemble des amplitudes des sinusoides qui la composent. On parle de fonction non périodique ou de signal quelconque, lorsque les sinusoides sont de fréquence et d'amplitude variables.

La théorie du signal fait donc référence à la représentation mathématique d'un signal dans le domaine de la ou des variables originales ou dans un domaine transformé, et à la modification (algorithmique) des signaux permettant d'extraire l'information utile.

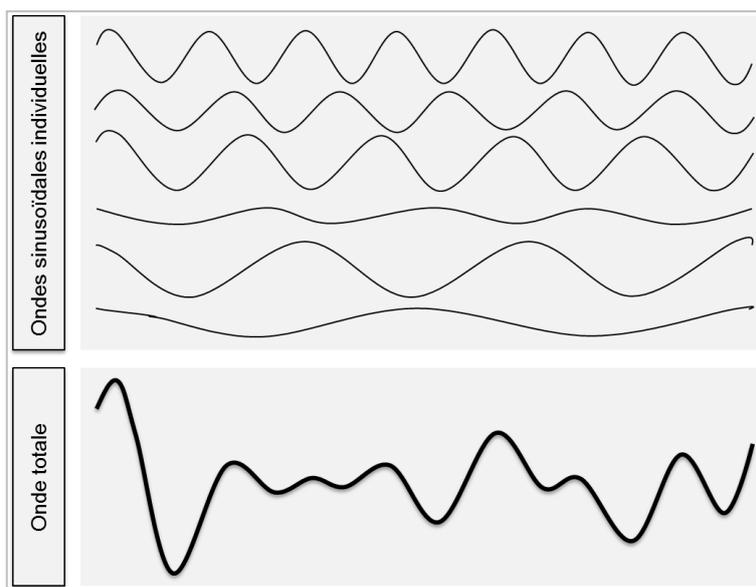


Figure 2.16. La somme de plusieurs ondes sinusoïdales forme une onde totale.

Pour analyser et traiter le signal, il existe plusieurs méthodes comme la transformation de Fourier ou en ondelettes (Tableau 2.7). De récents travaux se sont penchés sur la question de la structure spatiale à partir des ondelettes (Parrot et al., 2012)

³ TP³ La périodicité se définit par ce qui se reproduit à intervalles réguliers.

⁴ La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit pendant une durée déterminée.

Tableau 2.7. Récapitulatif des différentes méthodes de traitement du signal avec leurs avantages et inconvénients (Wiederkehr et al., 2009).

	Transformation de Fourier	Transformation de Fourier à fenêtres	Transformation en ondelettes
Type de décomposition	Fréquence	Temps (ou distance)-fréquence	Temps (ou distance)-échelle (le changement d'échelle entraîne un changement de fréquence)
Fonction analysante	Les sinus et les cosinus qui oscillent indéfiniment.	Une onde limitée dans le temps, multipliée par des oscillations trigonométriques (sinus et cosinus), la taille de la fenêtre est fixe pour chaque analyse, mais la fréquence à l'intérieur de la fenêtre varie.	Une onde limitée dans le temps, avec un nombre fixe d'oscillations ; on contracte ou dilate l'ondelette pour changer la taille de la « fenêtre » et donc l'échelle à laquelle on regarde le signal ; la fréquence de l'ondelette change en même temps.
Variable	Fréquence	Fréquence ; position de la fenêtre	L'échelle (donc la fréquence approximativement) ; la position de l'ondelette
Information	Les fréquences qui composent le signal	Plus la fenêtre est petite, mieux on localise dans le temps, mais on perd l'information sur les basses fréquences ; avec des fenêtres plus larges, on accède aux basses fréquences mais on localise mal dans le temps.	Avec des ondelettes étroites, on localise bien en temps, mal en fréquence. Avec des ondelettes larges, on localise bien en fréquence, mal en temps.
Signaux auxquels la transformée convient	Les signaux stationnaires (prévisibles car obéissant à des lois constantes).	Les signaux quasi-stationnaires (stationnaires à l'échelle de la fenêtre)	Les signaux non stationnaires surtout les signaux brefs et les signaux qui ont une structure intéressante aux diverses échelles (les fractales, par exemple)
Remarques	Avec la transformée de Fourier rapide (FFT), la transformée de Fourier d'un signal de n points nécessite $n \log n$ calculs.	On la nomme parfois « short-time Fourier analysis », car on fait coulisser la fenêtre le long du signal pour ne regarder qu'un intervalle à la fois, quand l'enveloppe est une gaussienne, la transformation est parfois nommée « transformation de Gabor ». La transformation de Fourier rapide (une forme de série de Fourier) est orthogonale.	Une transformée en ondelette peut être continue ou discrète ; une transformée discrète peut être orthogonale, bi-orthogonale ou non orthogonale. La transformée en ondelettes orthogonales d'un signal de n points nécessite cn calculs, où la constante c dépend de la complexité de l'ondelette employée.

Pour mettre en évidence la périodicité du signal, nous utilisons principalement l'autocorrélation spatiale. Cet outil mathématique permet une corrélation croisée du signal par lui-même pour mettre en évidence les régularités dans le signal malgré la présence de bruits. L'absence d'autocorrélation spatiale indique une répartition longitudinale aléatoire, non structurée. Lorsque la fonction sort de l'intervalle de confiance, cela indique au contraire qu'il y a une forte ressemblance des valeurs (valeurs positives) ou au contraire une forte dissemblance (valeurs négatives). Si la fonction fluctue et sort à intervalle régulier de son intervalle, cela indique que la structure est périodique. À une certaine distance qui se répète, il y a une forte autocorrélation (Aubry et Piegay, 2001) ; ces sorties de l'intervalle indiquent également la portée de cette structure (= lag).

4. Construction de métriques temporelles par agrégation d'états

Les métriques, brutes ou synthétiques, indiquent un état à l'instant t . Elles permettent de faire un état des lieux en répondant à une question donnée. Or le suivi sur plusieurs dates nécessite d'établir des métriques temporelles en agrégeant plusieurs états.

Par exemple, le taux d'érosion entre deux dates, se calcule en superposant la surface de bancs de galets par unité spatiale à l'instant t et à l'instant $t-n$.

Tableau 2.8. Exemples de métriques pouvant être extraites à partir de l'image (liste non-exhaustive) (Wiederkehr et al., 2008).

Paysage riverain		Objets anthropiques			Relief
Eau	Sédiments	Végétation	Occupation du sol	Aménagements	
chenal en eau, type de fond (végétation aquatique, sédiments...)	bancs de galets non végétalisés	végétation (espèces végétales, unités physiologiques)	habitats, cultures, industries, extraction de granulats...	ouvrages longitudinaux (digues), ouvrages transversaux (barrages, seuil)	vallée
largeur moyenne de la bande active ¹	nature des sédiments	nature des unités, des espèces	surface de zones agricoles	présence d'aménagements	longueur de la vallée [°]
nombre de chenaux en eau ¹	tailles des particules (D50, D90)	surface des habitats	surface de zones habitées	densité des aménagements ¹	pente de la vallée [°]
longueur cumulée des chenaux	surface des bancs	stress hydrique	surface de cultures	longueur endiguée ¹	présence de terrasses [°]
amplitude d'un méandre	indices granulométriques (Skewness, Kurtosis...)	densité de végétation ¹	nature des cultures		
profondeur du chenal		diversité paysagère ¹	développement de l'urbanisation ²		
concentration en MES		biomasse			
érosion des berges ²		taille des individus			
rétraction de la bande active ²		turn-over des habitats ²			
pente du lit [°]		évolution surfacique des habitats ²			
nature du fond					
nature de l'écoulement (turbulence) ¹					
facès ¹					

1 obtenu par agrégation spatiale
 2 obtenu par combinaison d'états
 ° traitement par photogrammétrie

E. Élaboration d'indicateurs d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau

L'évaluation de l'état physique des cours d'eau nécessite la mise en place d'indicateurs. Leur création demande de se poser en particulier deux questions pour en définir l'objectif. La première concerne l'échelle spatiale ; en effet un gestionnaire de rivières, qui travaille sur un tronçon de quelques kilomètres n'aura pas les mêmes préoccupations, ni les mêmes exigences que les agents de l'Agence de l'Eau, qui s'intéressent davantage à une échelle régionale. La seconde question concerne la thématique étudiée : suivant que l'on souhaite analyser les habitats piscicoles ou détecter les secteurs anthropiques intra-chenaux, les indicateurs sélectionnés seront interprétés ou utilisés différemment (Tableau 2.9).

Tableau 2.9. Exemples d'indicateurs (Wiederkehr et al., 2008).

Thèmes	Indicateurs		Sens possibles
Anthropique	sols anthropisés (%)	Élevé	→ pression forte sur la naturalité du corridor fluvial
Écologie Anthropique	indice de fragmentation	Fort	→ corridor discontinu fragmenté par les pressions humaines
Écologie	végétation mature (%)	Fort	→ pas de renouvellement des habitats; système vieillissant
Écologie Morphologie	digues	Présence	→ déconnexion lit mineur / lit majeur
Écologie Morphologie	ouvrages longitudinaux	Forte densité	→ réduction de l'espace de mobilité
Morphologie	bancs de galets (surface)	Élevée	→ stockage sédimentaire
Morphologie Anthropique	barrages, réservoirs	Présence	→ piégeage des sédiments, écrêtement des crues à l'aval
Morphologie Anthropique	digues	Présence	→ modification potentielle de la dynamique latérale
Morphologie Anthropique	extraction en lit mineur	Présence	→ transport solide potentiellement perturbé, érosion régressive et progressive
Morphologie	indice de sinuosité	$I_s < 1,05$	→ style fluvial rectiligne
		$1,05 < I_s < 1,50$	→ style fluvial sinueux
		$I_s > 1,50$	→ style fluvial méandrique
Morphologie	indice de tressage	Fort	→ tressage actif
Morphologie Anthropique	ouvrages transversaux	Présence	→ modification des flux (continuité amont/aval)
Morphologie	végétation pionnière (%)	Élevé	→ secteur dynamique latéralement

L'indicateur se définit comme « une métrique ou une combinaison de métriques qui indique un état ou une évolution utilisé pour établir un diagnostic et mettre en place une politique d'actions planifiées à l'échelle d'un territoire ou pour réaliser un suivi permettant de mesurer l'efficacité d'actions » (Wiederkehr et al., 2008). Cela signifie que la mise en place d'un indicateur implique la création d'une base de données, où pour chaque objet d'études (eau, bancs de galets, végétation) différentes métriques seront renseignées.

Une métrique peut servir à créer plusieurs indicateurs et un indicateur peut être formé à partir d'une ou plusieurs métriques. Une fois les métriques extraites, le nombre potentiel d'indicateurs est considérable. Il dépend des objectifs et de la connaissance acquise du terrain. Il est donc possible d'en créer une multitude comme : la densité d'alternance seuil / mouille par tronçon, les styles fluviaux, la densité d'écotone,...

À partir de la bibliothèque de métriques (qui peut être complétée si besoin) et l'objectif fixé en termes de renseignements, un indicateur est élaboré. Généralement, on peut distinguer les indicateurs d'état ou de structure spatiale des indicateurs d'évolution. Certains sont déjà largement utilisés, comme ceux concernant le style fluvial développés depuis une cinquantaine d'années (Brice, 1960, 1964 ; Leopold et Wolman, 1957). D'autres sont à affiner, voire à créer, comme ceux faisant référence à l'anthropisation du système. À partir de quelles limites peut-on considérer que les aménagements ont un impact important sur la continuité du réseau ? Existe-t-il une densité limite d'aménagements au-delà de laquelle l'impact est irréversible ?

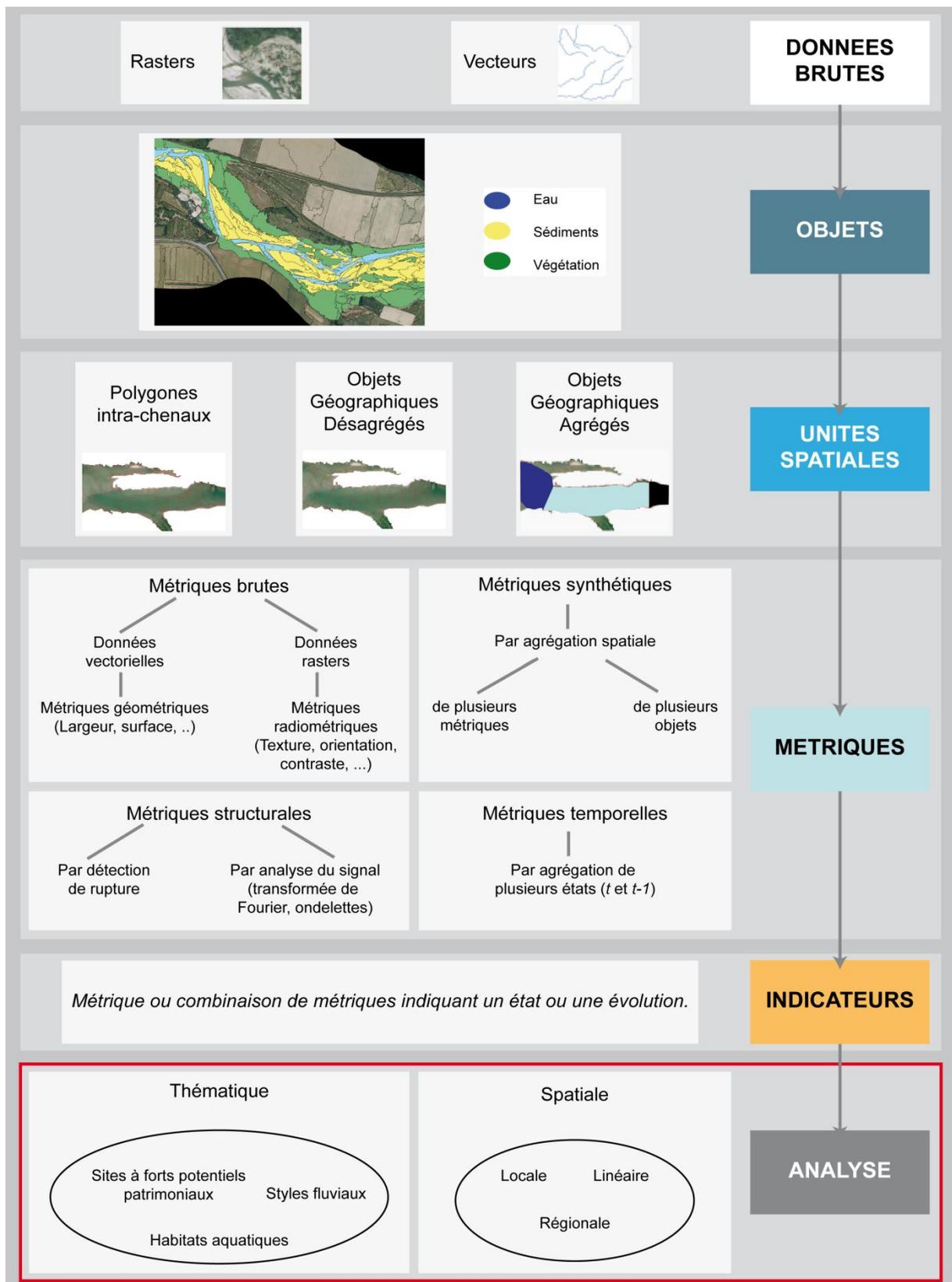
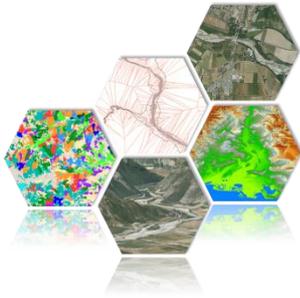


Figure 2.17. Schéma méthodologique général pour caractériser l'état physique des masses d'eau appliqué dans les différents travaux présentés dans le cadre de la thèse.



Partie 3. Étude à l'échelle du tronçon fluvial

Chapitre 1. Localisation et caractérisation des sites à forts potentiels patrimoniaux par requêtes spatiales et attributaires. Application à la Drôme.

- A. Introduction
- B. Outils et méthode
- C. Identification de sites à fort potentiel patrimonial
- D. Synthèse et discussion

Chapitre 2. Création d'indicateurs pour l'évaluation de l'état biophysique d'un réseau hydrographique par interrogation d'un Système d'Information Géographique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse

- A. Introduction
- B. Outils et méthode
- C. Exemples d'utilisation de la base de données spatialisée de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse
- D. Synthèse et discussion

Dans cette partie, nous présentons deux exemples d'application de la boîte à outils précédemment mise en place, pour établir un état des lieux de l'état physique du réseau hydrographique rhodanien. Les résultats exposés s'articulent autour du même objet, le tronçon fluvial, mais sur des territoires de tailles différentes (100 km du cours de la Drôme et sur l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien). Dans les deux cas, il s'agit i) d'identifier des tronçons géomorphologiques homogènes puis ii) d'extraire des métriques d'état physique à partir de données numériques.

Pour souligner l'intérêt de notre démarche et la capacité d'adaptation de cette méthode à des données de différentes natures et à des territoires de tailles diverses, nous avons choisi de répondre à plusieurs questions portant sur la caractérisation des réseaux hydrographiques. Ainsi, le premier chapitre traite de l'identification des secteurs potentiellement définissables en tant que géomorphosites.

Le second chapitre propose un élargissement du champ d'analyse à l'ensemble du bassin rhodanien, en segmentant le réseau hydrographique en tronçons géomorphologiques homogènes. L'extraction de métriques par tronçons homogènes permet d'obtenir une base de données originale de mesures physiques sur l'ensemble du bassin Rhône Méditerranée Corse utilisée notamment pour définir une typologie fluviale à l'échelle régionale.

*Chapitre 1. Localisation et caractérisation
des sites à forts potentiels patrimoniaux par
requêtes spatiales et attributaires.
Application à la Drôme.*

A. Introduction

1. Géomorphosites et réseaux hydrographiques
2. Inventaire exhaustif des géomorphosites
3. Objectifs

B. Outils et méthode

1. Données brutes
2. Mise en forme des données
3. De l'objet géographique à l'extraction de métriques
4. Identification des sites en gorges
5. Identification des corridors fluviaux à haut potentiel écologique

C. Identification de sites à fort potentiel patrimonial

1. Localisation et caractérisation des secteurs en gorges
2. Localisation et caractérisation des corridors fluviaux à haut potentiel écologique

D. Synthèse et discussion

1. Les bases de données info-cartographiques, des sources clés pour une pré-identification des géomorphosites
2. L'utilisation de l'imagerie : des défis encore à relever

Les réseaux hydrographiques abritent des sites à forts potentiels patrimoniaux (ou géomorphosites), par exemple, les gorges et les secteurs à lit mobile ou en tresses. Des outils de caractérisation physique des corridors fluviaux ont été mis en place pour les localiser de façon systématique. Nous nous sommes orientés vers l'utilisation des outils géomatiques afin d'éviter un travail de terrain long et fastidieux et pour obtenir un résultat homogène à l'échelle du bassin hydrographique. Deux exemples de géomorphosites potentiels sont détaillés, chacun s'appuyant sur une approche spécifique. Dans un premier temps, l'utilisation de couches vectorielles et d'un MNT ont permis de décrire la géométrie des plaines alluviales et de détecter les secteurs en gorges. Dans un second temps, nous avons couplé les données extraites des orthophotographies avec des informations vectorielles afin de caractériser les styles fluviaux et, in fine, d'identifier les zones à haute valeur biogéomorphologique comme les secteurs en tresses. Les corridors fluviaux à haut potentiel écologique ont également été mis en avant par une approche écotonale.

A. Introduction⁵

1. Géomorphosites et réseaux hydrographiques

Le paysage géomorphologique, tel que l'entend Reynard (2005), correspond à une portion du relief terrestre à la fois vue, perçue et exploitée par l'Homme, reflétant le fruit d'un incessant travail de processus qui ont forgé sa forme actuelle et qui seront également à l'origine de son évolution future. Au sein d'un paysage géomorphologique, certains auteurs identifient des « géomorphosites » (Panizza, 2001), ceux-ci étant définis comme des sites dont les propriétés géomorphologiques présentent un intérêt social. Le non-initié n'emploiera pas le mot de « géomorphosite » mais préférera qualifier tel ou tel site d'exceptionnel, de spectaculaire, voire de grandiose. Il ne suffit cependant pas d'appréhender la valeur esthétique d'un paysage pour en évaluer sa qualité exceptionnelle ; d'autres critères doivent également être pris en compte, qu'il s'agisse de la valeur culturelle, écologique ou même économique (Panizza et Piacente, 1993, 2003 ; Reynard, 2005). Par exemple, l'aspect grandiose de certaines formes comme les cheminées de fée et le « mystère » apparent qui tourne autour de leur formation constituent un attrait touristique notable. Lorsque la présence d'une espèce ou d'un habitat est dépendante du maintien des conditions géomorphologiques du site, l'attrait écologique fait aussi partie prenante de la valorisation d'un géomorphosite. Ce dernier est également un lieu pédagogique où la formation de la Terre, l'évolution du climat et de la vie peuvent être mieux comprises (Grandgirard, 1997 ; Panizza, 2001 ; Reynard, 2004). Les réseaux hydrographiques abritent de tels lieux, certains étant parfois spectaculaires : gorges, cascades, secteurs en tresses, marais, tourbières, bras morts. Ainsi, pour le scientifique, un tronçon dont le lit est latéralement mobile ou en tresses est synonyme de fortes potentialités écologiques (Florsheim et al., 2008 ; Ward et al., 2001) alors que l'amateur de sensations fortes préférera les secteurs en gorges, où il pourra s'adonner aux sports aquatiques dans un cadre naturel remarquable.

2. Inventaire exhaustif des géomorphosites

Aussi exceptionnels qu'il soit, ce type de sites n'est pas à l'abri de dégradations. Leur préservation tout autant que leur valorisation constituent *de facto* un enjeu en termes de gestion patrimoniale. Néanmoins, **les pratiques de gestion ne peuvent être planifiées et priorisées de manière cohérente que si ces sites ont été préalablement recensés**. Pour y parvenir, il est possible de recourir aux données préexistantes. Par exemple, les sites inventoriés dans un guide touristique comme « *valant le voyage* » (définition donnée par le Guide Vert Michelin ; (Collectif Michelin, 2012)) peuvent être considérés comme des géomorphosites ayant une valeur touristique. On peut également recourir aux documents cartographiques, comme les cartes topographiques, ou

⁵ Les résultats présentés ici sont issus de l'article « Localisation et caractérisation semi-automatique des géomorphosites fluviaux potentiels. Exemples d'applications à partir d'outils géomatiques dans le bassin de la Drôme. » (Wiederkehr et al., 2010b).

procéder à des prospections et une analyse géomorphologique *in situ* afin de repérer les sites potentiels. Cependant, la réalisation d'un inventaire exhaustif sur une aire géographique étendue peut se révéler longue et coûteuse. À l'échelle d'un grand bassin hydrographique comme celui du Rhône, il faudrait parcourir des milliers de kilomètres, ce qui prendrait des années, ou sélectionner seulement quelques secteurs, ce qui limiterait la portée de la démarche. Il faut donc des outils capables de renseigner de façon automatique ou semi-automatique la structure morphologique des tronçons fluviaux à petite échelle. De plus, pour des raisons opérationnelles, ces outils doivent être transposables d'une région à l'autre. En effet, il est intéressant que l'inventaire des géomorphosites potentiels, bien qu'étant réalisé sur de vastes territoires, repose sur les mêmes critères. Or, depuis une quinzaine d'années, des avancées importantes ont été réalisées en télédétection et en géomatique. Cela concerne non seulement les résolutions spectrales ou spatiales des images mais aussi leurs modes de traitement qui sont de plus en plus diversifiés. Ces améliorations permettent de renouveler la réflexion méthodologique concernant l'automatisation des techniques, la définition des métriques, les requêtes d'analyse spatiale via la géomatique à l'échelle d'un bassin hydrographique de plusieurs milliers de kilomètres. Ces progrès laissent entrevoir des pistes prometteuses en vue de la caractérisation physique d'un réseau hydrographique et ce, à trois échelles distinctes :

1. **à l'échelle locale**, les améliorations en termes de résolution spectrale et spatiale permettent d'extraire une information de haute qualité en limitant les collectes de données *in situ* (Lejot et al., 2007) ;
2. **à l'échelle d'un bassin hydrographique de quelques milliers de kilomètres carrés**, l'automatisation des méthodes d'extraction des informations permet d'obtenir rapidement des résultats homogènes sur l'ensemble du bassin (Reinfelds et al., 2004) ;
3. **à l'échelle du territoire métropolitain**, les sources de données disponibles sont nombreuses et variées et couvrent, pour certaines d'entre elles, ce territoire avec une résolution acceptable (<http://www.ign.fr/>).

3. Objectifs

L'objectif principal de cette partie est de présenter une méthode semi-automatique d'identification des géomorphosites potentiels le long du réseau hydrographique. Il s'agit de mettre en place un procédé permettant d'effectuer un inventaire de sites qui, selon des critères morphologiques, pourront être assimilés à des géomorphosites. Par définition, les géomorphosites doivent leur caractère spectaculaire à l'appréciation de l'Homme (raisons culturelles, sociétales ou économiques). Notre objectif ici n'est pas de dresser la liste ni de définir la nature des géomorphosites fluviaux mais de présenter une méthode permettant de les détecter. Il ne s'agit pas d'une démarche complète, allant de la caractérisation des paramètres morphologiques à la qualification finale de géomorphosites, mais d'un **outil d'aide à la localisation de sites potentiellement exceptionnels à l'échelle du bassin hydrographique**. C'est la première étape vers l'identification des géomorphosites, permettant d'envisager par la suite des politiques de planification des actions de préservation et de valorisation des paysages fluviaux de qualité. Pour y parvenir, nous proposons deux exemples basés sur l'utilisation de

données numériques rastérisées et vectorisées (BD Ortho[®], BD Topo[®]) et l'extraction de métriques permettant la création d'indicateurs de sélection des géomorphosites fluviaux. Deux types de géomorphosites fluviaux potentiels ont été sélectionnés afin d'asseoir la démarche :

1. **les secteurs de gorges, qui correspondent à une morphologie de vallée souvent spectaculaire et touristiquement attractive**, à l'image de certains tronçons du Verdon et de l'Ardèche. Pour des raisons esthétiques, scientifiques, socio-économiques, voire culturelles, les gorges peuvent être assimilées à des géomorphosites ;
2. **les tronçons fluviaux présentant un potentiel écologique**, qui s'exprime par des propriétés paysagères particulières partiellement intégrées par le style fluvial (présence d'un corridor naturel large bien préservé ; contact complexe entre les milieux terrestres et les milieux aquatiques ou forte mobilité en plan du lit). Au sein de la plaine alluviale, la présence d'écotones sur une longueur significative est un indicateur de la qualité écologique des corridors fluviaux (Naiman et Décamps, 1997 ; Paetzold et al., 2005 ; Ward et al., 1999). De même, les secteurs en tresses, qui doivent leur originalité physique et biologique aux conditions d'apports et de transfert hydrosédimentaires, sont des milieux fluviaux très dynamiques encore peu étudiés, et pourtant caractérisés par une forte diversité biologique, comme cela a été souligné par les travaux effectués sur le Rhône (Bravard et al., 1986), le Tagliamento (Arscott et al., 2000, 2002), le Val Roseg (Ward et Uehlinger, 2003) et la Drôme (Dufour et al., 2007).

B. Outils et méthode

Cette étude est réalisée sur la Drôme dont le système offre une diversité paysagère qui en fait un objet d'étude intéressant (Partie 1.B.1.1.2)

1. Données brutes

La détection des secteurs en gorges ainsi que des tronçons à haut potentiel écologique s'est faite à partir de données rastérisées et vectorisées (Figure 3.1). Nous avons extrait de la BD Topo[®] de l'IGN (Institut Géographique National), un MNT (Modèle Numérique de Terrain) au pas de 25 m, permettant notamment l'identification du fond de vallée (Alber et Piégay, 2008). La BD Carthage[®] de l'IGN, représentant le linéaire fluvial, a également été utilisée sous la forme d'une couche vectorielle. Quant à la BD Ortho[®], elle a servi à extraire sous forme vectorielle les objets composant le corridor alluvial (eau, bancs de galets et végétation riveraine). Les avantages et inconvénients de chacune de ces bases de données ont été précédemment présentés (Partie 2).

2. Mise en forme des données

Le fond de vallée (Partie 2.A) a été construit par Alber et Piégay (2008). À partir de la nouvelle couche vectorielle, les « grands » types de plaine alluviale, comme le type « confiné », ont pu être identifiés (Alber et Piégay, 2011). Nous avons identifié trois couches vectorielles par classification orientée-objet. (Partie 2.B). Chacune représentant un objet géographique : eau, bancs de sédiments et végétation.

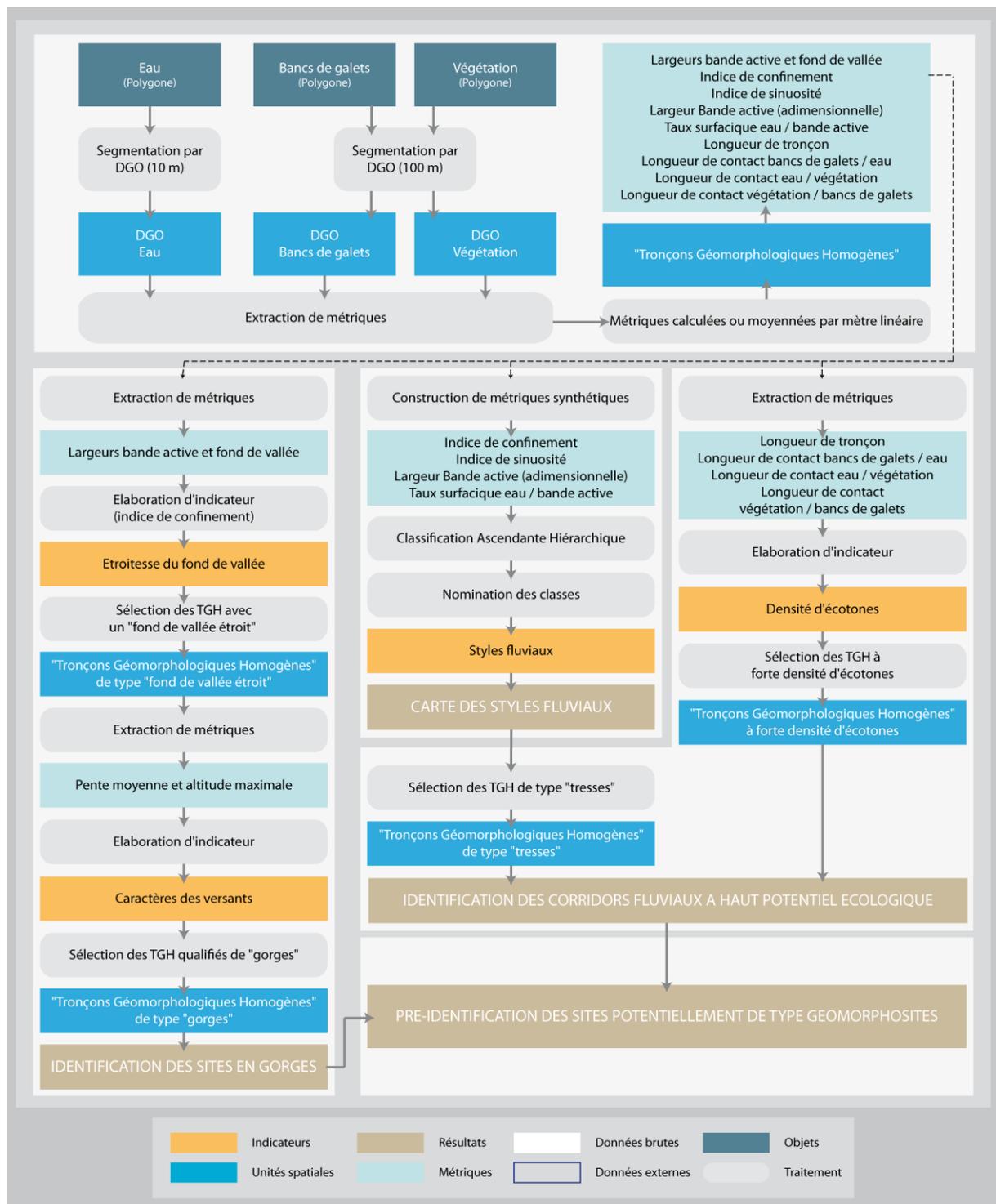


Figure 3.1. Schéma méthodologique : identification des sites potentiellement de type « géomorphosites » dans les réseaux hydrographiques.

3. De l'objet géographique à l'extraction de métriques

3.1. Construction de tronçons géomorphologiques homogènes

Afin de disposer d'un jeu d'entités géographiques ayant une signification physique et sur lesquels il est possible de produire des métriques et des statistiques associées (Clément et Piégay, 2003), nous avons créé des **Tronçons Géomorphologiques Homogènes**, noté **TGH** (Figure 3.3). Pour cela, nous avons utilisé deux couches vectorielles : *la bande active et le fond de vallée*. La largeur de la bande active a été calculée par unité spatiale de 10 m de long alors que la largeur du fond de vallée, longitudinalement moins variable, a été extraite par unité de 250 m (Alber et Piégay, 2011). La variabilité longitudinale de la largeur du fond de vallée, qui est un indicateur de l'organisation géologique du bassin, a permis notamment de distinguer les tronçons alluviaux des tronçons non alluviaux. La largeur de la bande active a permis quant à elle de différencier les zones à chenal unique des zones plus larges présentant de vastes surfaces en galets, exondées à l'étiage. Il s'agit d'un indicateur permettant de distinguer les tracés en plan en fonction de l'importance de la charge solide.

Une fois ces données acquises sur l'ensemble du linéaire drômois, un test de rupture de Pettitt (Pettitt, 1979) a été appliqué sur chacune des deux séries afin d'identifier des unités spatiales réagrégées. Il s'agit de tronçons homogènes en moyenne en termes de largeur de fond de vallée d'une part et de largeur de bande active d'autre part. L'absence de rupture dans la série (Xi) de taille N est l'hypothèse nulle. 43 tronçons homogènes en termes de largeur de la bande active et 20 tronçons homogènes en termes de largeur du fond de vallée ont été identifiés. En combinant ces deux séries, on obtient 53 tronçons géomorphologiquement homogènes (Figure 3.2) qui seront utilisés pour la suite de la caractérisation.

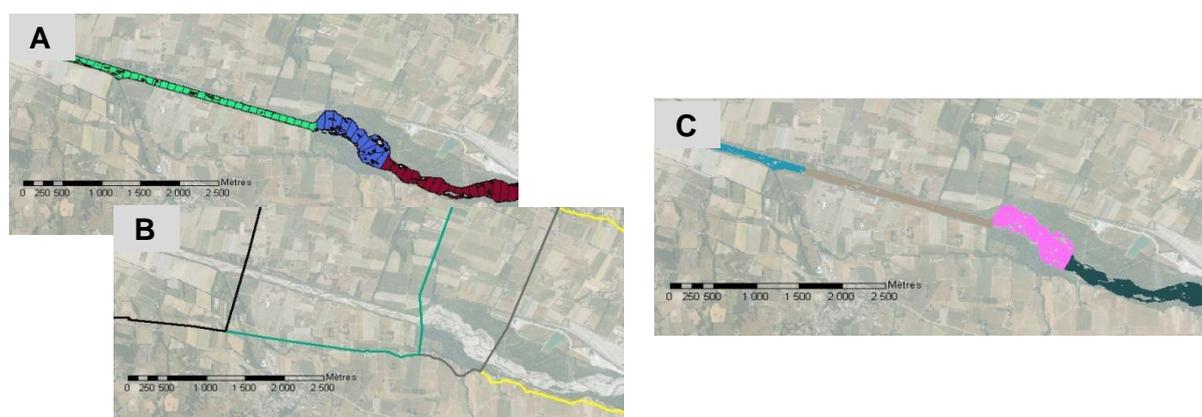


Figure 3.2. Segmentations de la bande active (A) en fonction de sa largeur, du fond de vallée (B) en fonction de sa largeur, donnant des tronçons géomorphologiques homogènes (C).

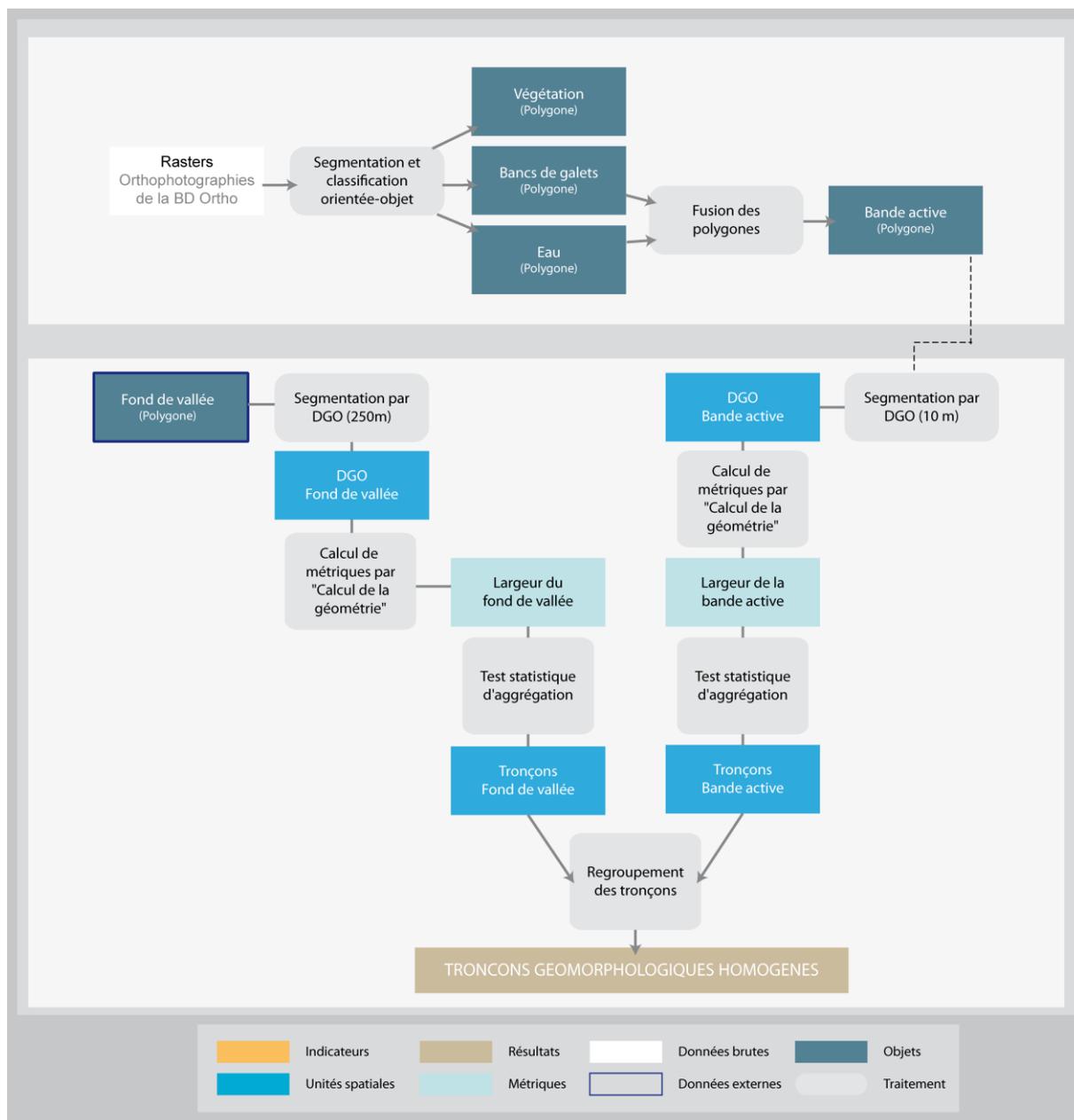


Figure 3.3. Schéma méthodologique : construction de tronçons géomorphologiques homogènes sur la Drôme.

3.2. Extraction de métriques

Comme dans le cas de la largeur du fond de vallée ou de la bande active, l'extraction des métriques (Tableau 3.1) permettant de caractériser les tronçons identifiés précédemment a été réalisée de façon spatialement continue et homogène à partir de segments d'extraction des données, dont la longueur était adaptée à la taille des objets.

Les segments (ou objets géographiques désagrégés, DGO) utilisés faisaient 10 m de long pour le chenal en eau et 100 m de long pour les bancs de galets et la végétation riveraine. En fait, la taille de ces segments doit être plus petite que la taille des objets initiaux afin d'éviter de prendre en compte plusieurs objets de même nature au sein d'un même segment. Qu'elles soient géométriques (surface, largeur ; issues d'une couche vectorisée) ou radiométriques (déterminées à

partir des orthophotographies), les métriques ont été extraites à partir de ces segments. Ces métriques ont ensuite été moyennées ou calculées par mètre linéaire afin de décrire chacun des tronçons géomorphologiques. Dans le cas des gorges, le tronçon a été également caractérisé par des buffers (zones tampons), qui sont des segments d'extraction longitudinaux. Ceux retenus avaient une largeur de 10 m au sein desquels d'autres métriques ont été extraites comme des percentiles d'altitude ou des valeurs de pente. Cette démarche a permis de calculer la hauteur de la gorge, la pente de ses versants, son ouverture sommitale ou encore sa symétrie, autant de métriques permettant de caractériser la valeur patrimoniale du site.

Tableau 3.1. Métriques extraites par tronçons géomorphologiques homogènes utilisées dans le cadre de la pré-identification des sites potentiellement de types géomorphosites.

Métrique		Données sources	Méthode	Type	Unité
Largeur de bande active	Métrique brute	BD Ortho®		Réel	Mètres
Largeur du fond de vallée	Métrique brute		Moyenne des DGO fond de vallée	Réel	Mètres
Pente moyenne	Métrique brute	MNT (BD Topo®) au pas de 25 m	Analyse spatiale par segment	Réel	Pour cent
Altitude maximale	Métrique brute	MNT (BD Topo®) au pas de 25 m	Analyse spatiale par segment	Réel	Mètres
Indice de confinement	Métrique synthétique	BD Ortho®	Largeur de la bande active / Largeur du fond de vallée	Réel	Aucune
Indice de sinuosité	Métrique synthétique	BD Ortho®	Longueur du TGH / Longueur à vol d'oiseau	Réel	Aucune
Largeur de bande active (adimensionnelle)	Métrique synthétique	BD Ortho®		Réel	Aucune
Taux surfacique eau / bande active	Métrique synthétique	BD Ortho®		Réel	Aucune
Longueur de tronçon	Métrique brute	BD Ortho®	Longueur du TGH - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	Mètres
Longueur de contact bancs de galets / eau	Métrique brute	BD Ortho®	Longueur du TGH - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	Mètres
Longueur de contact eau / végétation	Métrique brute	BD Ortho®	Longueur du TGH - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	Mètres
Longueur de contact végétation / bancs de galets	Métrique brute	BD Ortho®	Longueur du TGH - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	Mètres

4. Identification des sites en gorges

Pour identifier un site en gorges, deux indicateurs ont été retenus : **l'étroitesse du fond de vallée et les caractères des versants**. Afin de détecter automatiquement ces secteurs en gorges, un indice de confinement du fond de vallée a été calculé pour chaque tronçon géomorphologiquement homogène identifié précédemment. Le confinement s'évalue comme le rapport entre la largeur de la bande active et la largeur du fond de vallée. Plus ce rapport est proche de 1, plus la place occupée par le cours d'eau dans le fond de vallée est grande. Cet indice a permis de rendre compte du contrôle exercé par la vallée sur le tracé du cours d'eau. Différentes valeurs de l'indice ont été testées visuellement et la valeur de 0,3 a été retenue (Figure 3.4). Ainsi, cette étape a permis de localiser les vallées étroites. Une fois cette première sélection faite, la forme des versants et leur hauteur ont été calculées pour chacune des vallées retenues afin de

distinguer les gorges proprement dite des vallées en V, largement évasées et parfois faiblement incisées dans les plateaux environnants. Les gorges étant par définition, des vallées étroites aux versants escarpés, au sein des secteurs à fond de vallée étroit, la morphologie des versants a été caractérisée à partir des données du MNT synthétisées à l'intérieur de buffers dont la largeur dépend de celle du fond de vallée. Une pente moyenne et une altitude maximale ont été également extraites de chacun des buffers.

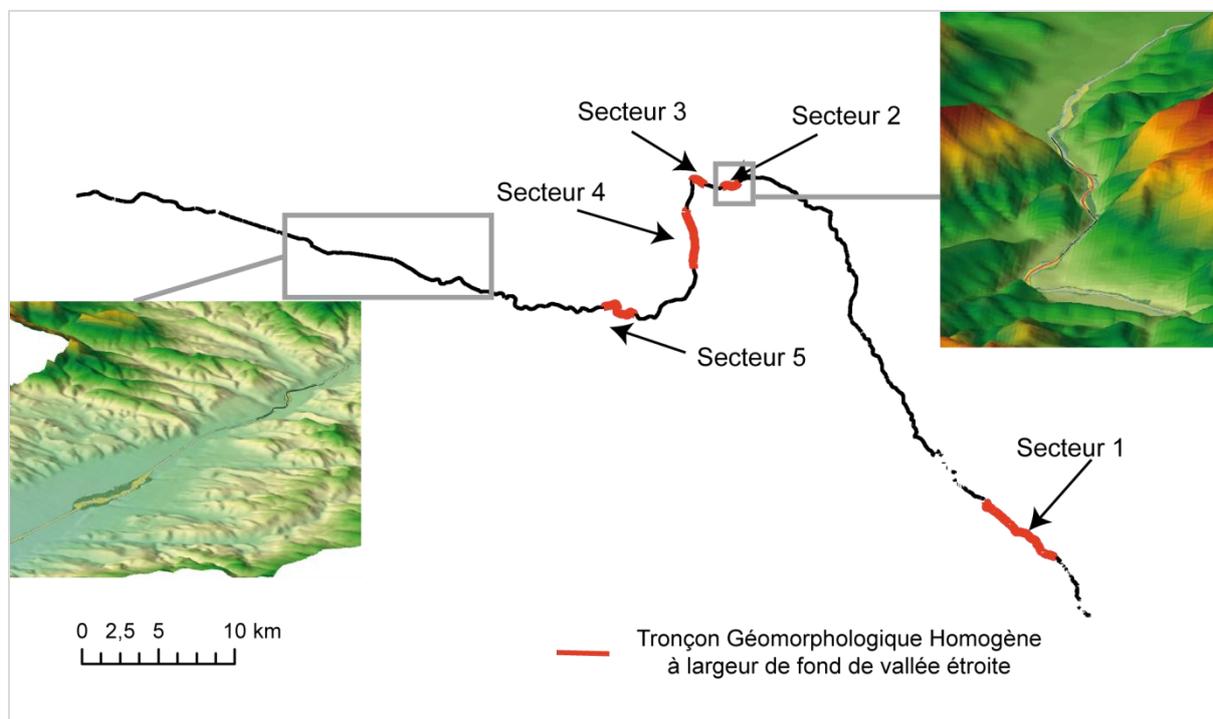


Figure 3.4. Localisation des tronçons dont le fond de vallée est significativement étroit.

5. Identification des corridors fluviaux à haut potentiel écologique

5.1. Détermination par les styles fluviaux

La combinaison de certaines de ces métriques a permis la détermination des styles fluviaux, offrant ainsi la possibilité d'identifier les zones à fort potentiel écologique ou, au contraire, celles où l'intervention humaine a pu détériorer la qualité du corridor comme, par exemple, les zones endiguées. Les précédents travaux portant sur la détermination des styles fluviaux reposent bien souvent sur le même type de métriques, i.e. planimétriques (Beechie et al., 2006 ; Leopold et Wolman, 1957 ; Schumm, 1985 ; Ward et al., 2002).

En s'appuyant sur ces connaissances, nous avons extrait pour chaque tronçon homogène quatre métriques synthétiques résultant pour les trois premières de la moyenne des métriques calculée au niveau des segments d'extraction :

1. la **largeur moyenne de la bande active normalisée par la taille du bassin versant**, qui a permis d'appréhender les anomalies locales de la largeur et notamment les secteurs endigués qui présentaient une largeur très faible pour une taille de bassin donnée ;

2. l'**indice moyen de confinement**, qui donne une indication sur les possibilités de déplacement latéral du cours d'eau. Cet indice est le rapport de la largeur de la bande active par la largeur du fond de vallée ;
3. la **part occupée par le chenal en eau au sein de la bande active**, apportant des indications sur l'abondance de la charge solide en transit (Alber et Piégay, 2011) ;
4. l'**indice de sinuosité** du cours d'eau, qui est le rapport entre la longueur de l'axe médian de la bande active divisée par la longueur de l'axe médian du fond de vallée. Ce dernier indice ne repose pas sur une moyenne des métriques extraites par segment mais sur deux métriques renseignées à l'échelle du tronçon homogène.

5.2. Détermination par densité d'écotones

Une autre manière d'identifier les sites à haute valeur écologique a été de quantifier le linéaire de contact entre les taches paysagères, ce que les écologues appellent un écotone. Celui-ci correspond à une zone de transition entre deux écosystèmes. Bien qu'étant parfois une frontière entre deux systèmes pour certaines espèces - par exemple une île qu'un poisson est obligé de contourner pour se rendre d'une rive à l'autre -, l'écotone joue un rôle important dans le maintien de la biodiversité en lien avec une forte spécificité écologique (Naiman et Décamps, 1997). L'intérêt de cette démarche par rapport à la précédente est qu'elle a permis l'identification de sites fondée sur des métriques caractérisant la bande naturelle, sans avoir recours à des données vectorielles caractérisant le fond de vallée.

C. Identification de sites à fort potentiel patrimonial

L'objectif est de localiser des sites potentiellement intéressants en termes de patrimonialisation à l'échelle d'un réseau hydrographique. Pour cela, nous tentons d'identifier deux types pouvant être potentiellement considérés comme des géomorphosites. D'une part, **les secteurs en gorges** et d'autre part **les secteurs à haut potentiel écologique**.

1. Localisation et caractérisation des secteurs en gorges

Les secteurs en gorges correspondent à des vallées étroites et profondes aux versants relativement raides (Germaine, 2008). Nous les avons considérés comme des géomorphosites en raison, notamment, de l'aspect spectaculaire de leur forme, expliquant l'attrait qu'ils exercent sur les touristes. Il s'agit dans cette partie de présenter les résultats d'une identification des secteurs en gorges, servant de présélection à des géomorphosites de type gorges. Dans le bassin de la Drôme, un seul tronçon a été qualifié *in fine* de gorges parmi les cinq secteurs étroits identifiés préalablement. Ce secteur a été décrit à l'aide de plusieurs métriques comme la largeur moyenne de la bande active, la longueur du tronçon, l'indice de sinuosité du fond de vallée, l'évasement de la vallée et sa hauteur (Figure 3.5 et Tableau 3.2).

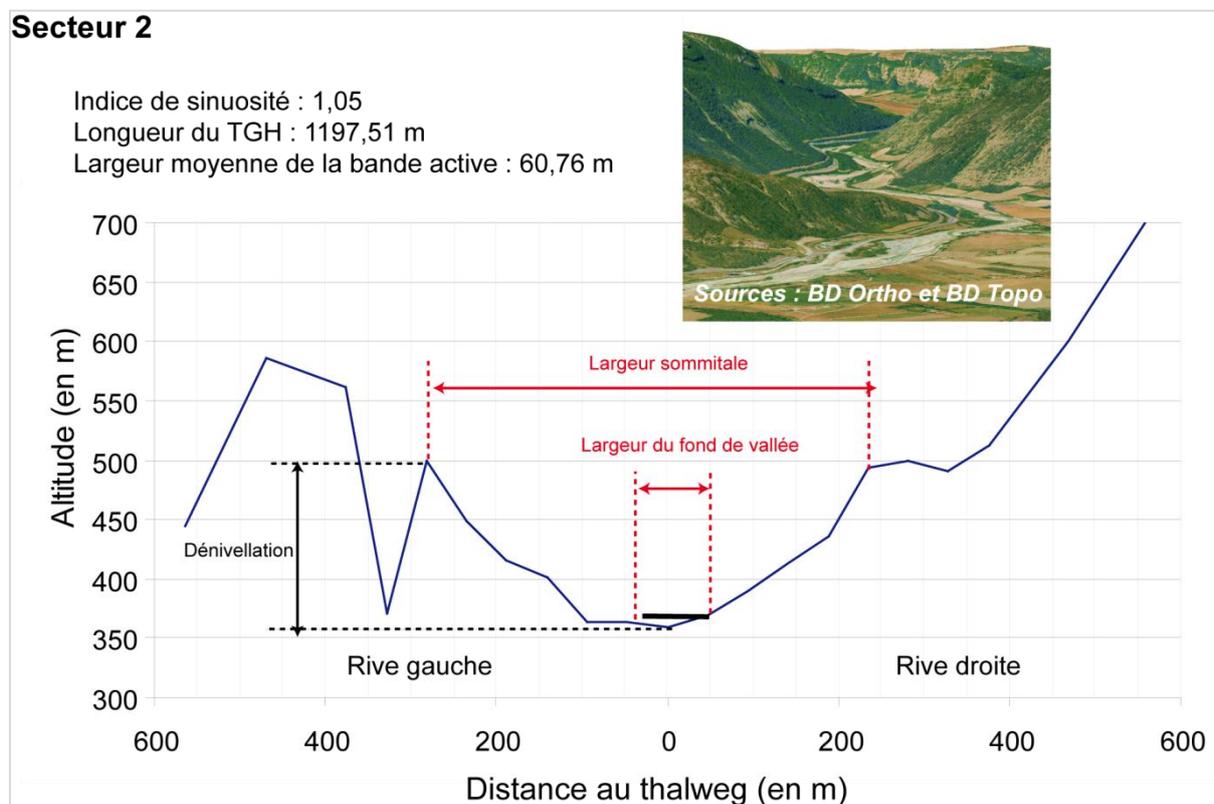


Figure 3.5. Tronçon géomorphologique homogène identifié comme un site en gorges.

Tableau 3.2. Présentation des métriques extraites pour caractériser les secteurs à fond de vallée étroit (NR : Non Renseigné).

	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	Secteur 5
Largeur moyenne du fond de vallée (en m)	125,81	187,81	277,26	367,52	178,5
Largeur sommitale (en m)	NR	704,27	554,53	NR	401,63
Indice (fdv/sommet)	NR	0,27	0,5	NR	0,44
Altitude max (en m)	Rive gauche	NR	352	399	317
	Rive droite	671	442	NR	337
Altitude moyenne du fond de vallée (en m)	670,5	361	352	316,5	259,5
Dénivellation max (en m)	NR	138	90	NR	77,5
Pente moyenne (%)	Rive gauche	NR	16,35	36,85	36,47
	Rive droite	52,65	43,91	NR	39,51

2. Localisation et caractérisation des corridors fluviaux à haut potentiel écologique

Le deuxième exemple de pré-localisation de géomorphosites à partir d'outils géomatiques est centré sur la détection de secteurs à fort potentiel écologique. Là encore, la démarche de sélection a reposé sur des requêtes établies à partir des caractères planimétriques des taches paysagères. Nous avons retenu deux indicateurs : **le style fluvial** et **la densité d'écotones**. Dans le premier cas, parmi tous les styles identifiés, seuls certains comme le tressage ont été considérés comme des indicateurs d'un bon potentiel écologique. Dans le second cas, l'indication a été apportée par une forte valeur absolue de la métrique retenue.

2.1. Caractérisation par les styles fluviaux.

Nous avons mis en place une banque de données rassemblant plusieurs métriques (largeur et longueur de la bande active ou du fond de vallée, surface en eau, etc.) pour chacun des 53 tronçons homogènes.

Par ailleurs, une classification ascendante hiérarchique (Lebart et al., 1995) a été réalisée sur le jeu de données des 53 tronçons et des quatre variables. La lecture du dendrogramme résultant de cette analyse a permis de distinguer cinq classes (Figure 3.6), correspondant chacune à un style fluvial particulier allant d'un chenal unique, étroit et sinueux à un lit en tresses (Tableau 3.3 et Figure 3.7). Afin de caractériser chaque style, la distribution statistique (médiane, quartiles) de chacune des métriques a été représentée graphiquement par classe (Figure 3.6).

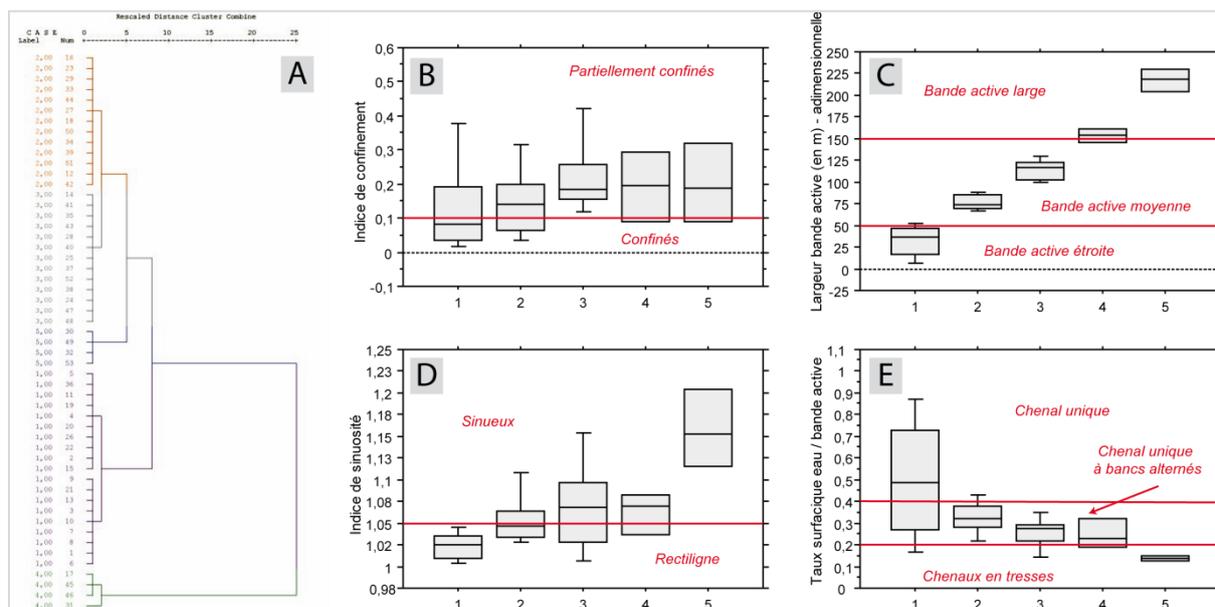


Figure 3.6. Résultat de la classification ascendante hiérarchique réalisée sur 53 tronçons fluviaux caractérisés par quatre métriques géomorphologiques.
 A : Dendrogramme ordonnant les 53 tronçons et les distributions par classes. B : Indice de confinement. C : Largeur de la bande active. D : Indice de sinuosité. E : Taux surfacique eau / bande active.

Tableau 3.3. Caractéristiques des styles fluviaux déterminés sur la Drôme.

Classes	Largeur de la bande active	Indice de sinuosité	Indice de confinement	Taux surfacique eau / bande active	Style fluvial
1*	Étroite	Rectiligne	Confinés	Unique	Chenal en eau étroite et rectiligne
2	Moyenne	Rectiligne	Partiellement confinés	Unique à bancs alternés	Chenal rectiligne de largeur moyenne à bancs alternés
3	Moyenne	Sinueux	Partiellement confinés	Unique à bancs alternés	Chenal divagant de largeur moyenne à bancs alternés
4	Large	Sinueux	Partiellement confinés	Unique à bancs alternés	Chenal divagant à bancs alternés avec une large bande active partiellement confinée
5	Large	Sinueux	Partiellement confinés	Tresses	Chenaux en tresses avec une large bande active

* cours d'eau confinés

Une fois cette identification réalisée, les secteurs en tresses considérés comme des lieux à fort potentiel écologique ont pu être localisés, la carte dressée pouvant alors servir d'aide à la reconnaissance de géomorphosites (Figure 3.8).



Figure 3.7. Classes géomorphologiques déterminées à partir de la classification ascendante hiérarchique.

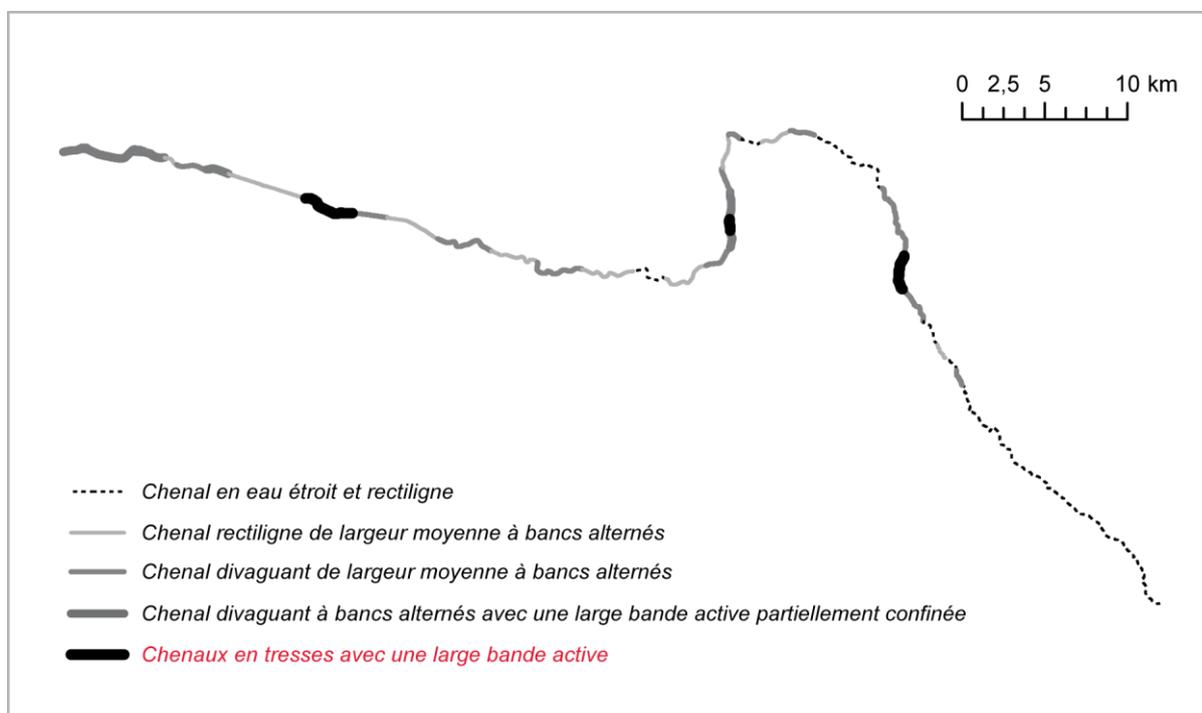


Figure 3.8. Répartition longitudinale des styles fluviaux le long du cours principal de la Drôme.

2.2. Caractérisation par l'approche écotonale.

Au sein des corridors fluviaux, nous avons identifié trois types d'écotones : contact milieu aquatique / alluvions nus ; contact alluvions nus / milieu arboré riverain ; contact milieu arboré riverain / milieu aquatique. Pour chaque tronçon homogène, la longueur cumulée de ces trois types de contact et leur densité (rapport entre la longueur cumulée de contacts et la longueur du tronçon homogène) a été calculée et cartographiée (Figure 3.9).

Ainsi, on constate que suivant le type d'écotones, les tronçons à forte densité ne sont pas exactement les mêmes. On remarque que l'écotone milieu aquatique / alluvions nus est celui qui a le nombre de tronçon à forte densité le plus important, vient ensuite celui du milieu arboré riverain / milieu aquatique, pour finir par l'écotone milieu arboré riverain / milieu aquatique dont la présence est plus rare. Concernant l'identification de potentiels géomorphosites, les tronçons dont la densité d'écotone est forte pour les trois types peuvent être assimilés à de potentiels géomorphosites, dont la diversité des milieux peut laisser suggérer qu'il s'agit de secteurs intéressants en termes de patrimonialisation.

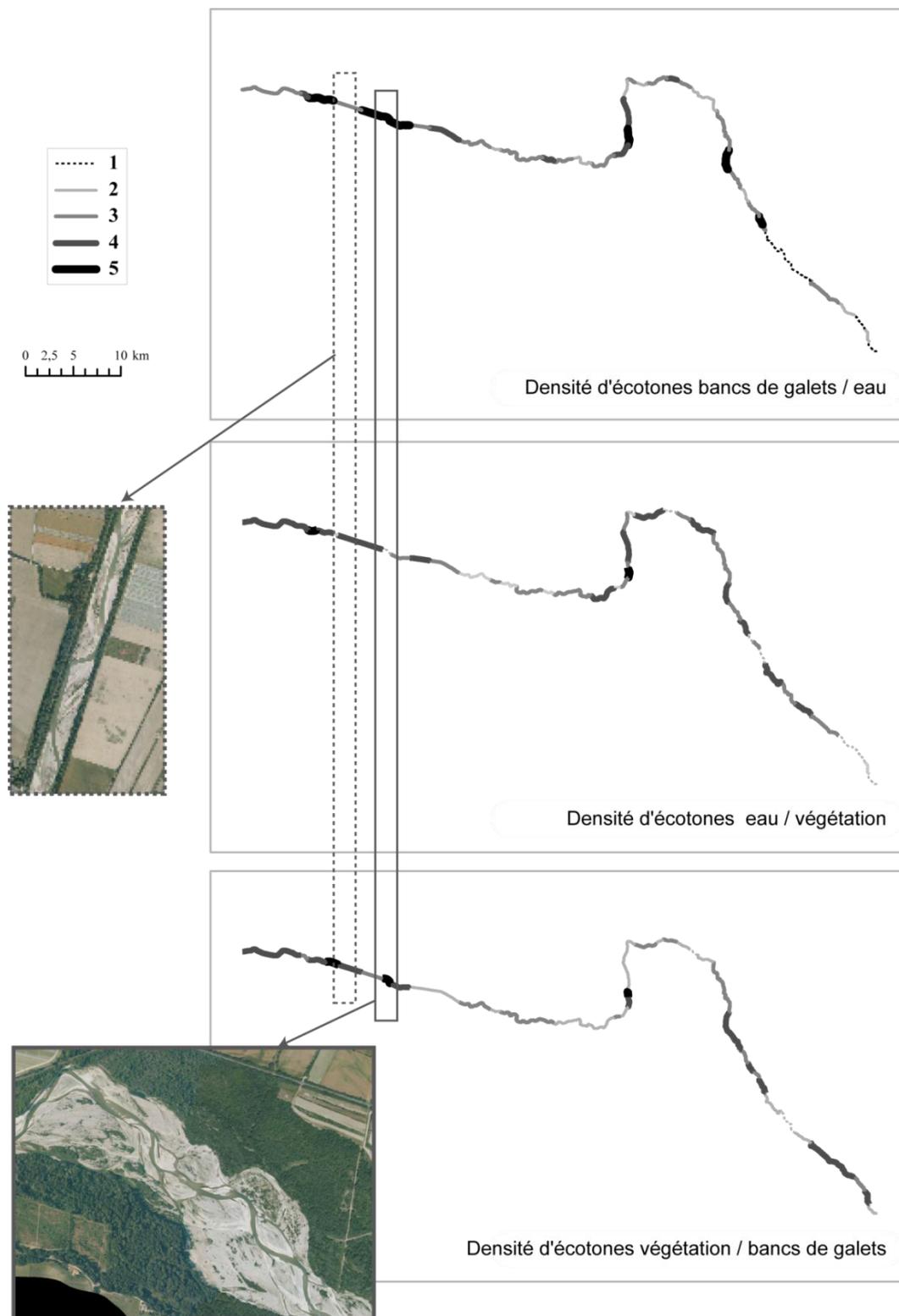


Figure 3.9. Cartographie de la densité d'écotones par tronçons homogènes du corridor fluvial de la Drôme. 1 : très faible ; 2 : faible ; 3 : moyenne ; 4 : forte ; 5 : très forte. Méthode : pour chaque tronçon homogène la longueur de contact entre deux écosystèmes est divisée par la longueur du tronçon.

D. Synthèse et discussion

La multiplication des directives, des lois et des règlements dans le but de préserver ou de restaurer le patrimoine naturel implique de pouvoir localiser les sites à caractères exceptionnels comme les géomorphosites. Dans cette partie, nous avons mis en avant des développements méthodologiques permettant la localisation semi-automatique de sites pouvant être qualifiés de géomorphosites fluviaux tels que les gorges et les tronçons en tresses ou à fort potentiel écologique. Ces développements méthodologiques permettent d'envisager de nouvelles perspectives de travail non seulement pour le recensement des géomorphosites mais aussi dans le cadre d'autres travaux de caractérisation des milieux fluviaux à grande ou petite échelle. À partir de la méthode présentée, d'autres types de géomorphosites pourraient être abordés, comme les secteurs à forte mobilité latérale, en incluant un paramètre historique. Il s'agirait alors d'étudier le déplacement latéral de la bande active par unité spatiale à des dates différentes. Nous pouvons également envisager de travailler en se focalisant sur l'objet eau, afin de caractériser les habitats piscicoles (Partie 4) en vue de l'amélioration des modèles existants (Ginot, 1998 ; Ginot et al., 1998 ; Lamouroux, 2002 ; Waddle, 2012), ou sur l'objet ripisylve, afin de développer des modèles régionalisés de répartition des espèces et des habitats.

1. Les bases de données info-cartographiques, des sources clés pour une pré-identification des géomorphosites

Les géomorphosites sont considérés comme des sites exceptionnels, voire grandioses, à plusieurs titres : paysagers, écologiques, économiques, historiques, ou bien touristiques (Panizza et Mennella, 2007). Pour valoriser, préserver ou même restaurer de tels sites, les opérateurs publics doivent disposer d'informations cartographiques et de méthodes géomatiques pour les répertorier et les caractériser (Pereira et al., 2007 ; Reynard et al., 2007 ; Zouros, 2007). La démarche d'extraction présentée ici est avant tout méthodologique. Ainsi, nous avons retenu plusieurs sources d'information disponibles qui peuvent se combiner, à savoir un MNT, des couches vectorielles existantes (des polygones et des polygones) et des orthophotographies. Plusieurs types d'indicateurs ont également été retenus, faisant appel à des procédures de segmentation latérale (buffers) et longitudinale (segments élémentaires) et à des objets linéaires ou surfaciques agrégés, permettant une pré-identification des géomorphosites fluviaux. La méthode peut être facilement généralisée à des linéaires plus étendus et s'appuyer sur d'autres métriques. Pour autant, cette méthode d'identification des sites à fort potentiel patrimonial ne permet pas d'identifier les géomorphosites. En effet, selon Panizza et Piacente (1993), de tels sites présentent des qualités esthétique, culturelle, écologique ou même économique qui doivent s'apprécier par d'autres voies. Les questions esthétiques pourraient notamment s'intégrer facilement à la présente démarche compte tenu des récents développements proposés par Piégay et al. (2005b), LeLay et al. (2005), Cottet (2010). Si à l'heure actuelle, il n'est pas possible de détecter automatiquement les

géomorphosites, la détermination de sites potentiels, compte tenu de leurs caractéristiques morphologiques, reste utile car elle offre la possibilité d'une présélection semi-automatique à l'échelle des bassins hydrographiques étendus, réduisant d'autant le temps nécessaire ensuite pour les déterminer à partir des critères de Panizza et Piacente (1993).

2. L'utilisation de l'imagerie : des défis encore à relever

Par ailleurs, les orthophotographies sont prises à des heures différentes de la journée, celles-ci étant ensoleillées ou non. Des problèmes d'ombres portées se posent ainsi variablement dans l'espace, d'une dalle à l'autre. Un chenal en eau ombragé présentera une faible radiométrie et se confondra alors bien souvent avec la végétation arborescente riveraine. De fait, la qualité de la classification et de l'information finale sera géographiquement variable. Les conséquences de ce phénomène ne sont pas encore pleinement identifiées. Reste que les premiers tests que nous avons réalisés dans le bassin de la Drôme se révèlent très encourageants. Nous avons pu travailler sur plus de 80 % du linéaire sans discontinuités en remontant 18 km seulement à l'aval de la source et couvrir ainsi des cours d'eau dont la largeur varie de 3 m à 150 m. Il est évident que nous ne pouvons disposer de toutes les métriques sur tout le linéaire et les données qui ne peuvent pas être extraites à partir d'images pourront provenir de sources externes. Identifier le linéaire qui ne peut être caractérisé par image constitue en soi une information qu'il serait utile d'avoir. Ce linéaire a d'ores et déjà un sens typologique et fonctionnel, puisqu'il concerne des cours d'eau de petite taille dont le miroir est couvert par la canopée. Le contact entre ce réseau et celui qui est caractérisable est, par ailleurs, sans doute complexe, discontinu en plan et peut aussi avoir un sens typologique.

*Chapitre 2. Création d'indicateurs pour
l'évaluation de l'état biophysique d'un
réseau hydrographique par interrogation
d'un Système d'Information Géographique.
Application au bassin Rhône
Méditerranée Corse*

A. Introduction

B. Outils et méthode

1. Sectorisation du réseau hydrographique en Tronçons Géomorphologiques Homogènes (TGH)
2. Extraction de métriques par Tronçons Géomorphologiques Homogènes
3. Création d'une base de données spatialisées de mesures physiques du corridor fluvial à l'échelle du bassin RMC

C. Exemples d'utilisation de la base de données spatialisée de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse

1. Typologie régionale de la morphologie des cours d'eau
2. Interrogation de la base de données pour identifier les secteurs à haute valeur patrimoniale
3. Interrogation de la base de données pour déterminer des secteurs présentant une forte mobilité latérale potentielle

D. Synthèse et discussion

1. Typologie à l'échelle régionale
2. Base de données : perspectives d'améliorations

Pour répondre aux exigences de la Directive Cadre européenne sur l'Eau, un état des lieux des conditions hydrogéomorphologiques a été engagé sur le bassin rhodanien. Afin de le mener à bien et de permettre de récolter des données homogènes sur l'ensemble de ce territoire, l'utilisation des données vectorielles issues de la BD Topo[®] de l'IGN a été préférée à des acquisitions de terrain.

À partir de ces données, une méthode semi-automatique permettant de renseigner des indicateurs de qualité physique des milieux aquatiques à l'échelle du bassin du Rhône a été établie. Dans un premier temps, nous avons défini des Tronçons Géomorphologiques Homogènes. Pour chacun d'eux, plusieurs métriques ont ensuite été renseignées : indice de sinuosité, indice de confinement, taux surfaciques eau / bande active et bande active / bande fluviale, pente, largeur de la bande active adimensionnelle et écart interquartile calculé sur la largeur de la bande active. Une analyse statistique a permis d'identifier 18 styles fluviaux pour l'ensemble du bassin du Rhône. Différentes requêtes sont alors possibles, comme la détection des secteurs en tresses présentant une forte diversité potentielle d'habitats ou l'application de modèles.

A. Introduction⁶

Les rivières présentent le long de leur cours, une variabilité des conditions morphologiques et fonctionnelles. Le découpage du système fluvial en secteurs homogènes sur l'ensemble ou partie de son linéaire, selon différents critères (hydrologiques, morphologiques, écologiques) s'appelle la sectorisation (Schmitt, 2001). Précédemment, nous avons mené une analyse à l'échelle du tronçon, sur le réseau drômois. À présent, il s'agit d'étendre le champ d'investigations à l'ensemble du bassin rhodanien et de présenter des exemples d'études de l'état biophysique de ce réseau des tronçons fluviaux au sein du réseau hydrographique.

Dans ce chapitre, l'objectif principal est d'obtenir et d'exploiter des données **continues et homogènes sur le réseau rhodanien** en privilégiant les données numériques à celles du terrain. Le second objectif qui en découle est de fournir des données exploitables sur l'ensemble du bassin. Il ne s'agit pas seulement de mettre à disposition de simples mesures mais de présenter également des exemples d'application de ces métriques, en mettant en place des indicateurs. Ces exemples permettent d'illustrer la démarche amenant à la création d'une base de données spatialisée de mesures physiques du corridor fluvial à l'échelle du bassin RMC, puis à son exploitation. Les indicateurs ainsi élaborés nous ont permis de réaliser une *typologie régionale* des masses d'eau (Partie 3.Chapitre 2.C.1) et de montrer comment cette base de données peut être interrogée pour extraire les données nécessaires pour, par exemple, *cibler des secteurs à haute diversité d'habitats* (Partie 3.Chapitre 2.C.2) ou *alimenter des modèles régionaux* (Partie 3.Chapitre 2.C.3).

Les mesures physiques issues du réseau hydrographique du bassin RMC ont été regroupées dans un Système d'Information Géographique. Ce système favorise la gestion et la manipulation des données spatiales. Le SIG créé est géré par l'environnement ESRI, il se décompose en trois volets (Site ESRI : www.esrifrance.fr) :

- ✓ La partie GeoTraitement, qui regroupe les « outils » nécessaires à l'interrogation des données par des requêtes spatiales ou attributaires, avec notamment les modules d'analyse spatiale, de calcul de géométrie, C'est à partir de là, que nous avons effectué tous les calculs et les traitements permettant d'extraire les métriques.
- ✓ La partie GeoVisualisation, à partir de laquelle nous présentons sous forme de cartes les informations pertinentes mises en valeur.
- ✓ La partie GeoDatabase, qui sert à la gestion de l'ensemble des couches vectorielles générées.

⁶ Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus d'une étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Eau RMC et de la Zone Atelier Bassin du Rhône (Wiederkehr et al., 2012).

B. Outils et méthode

Dans cette partie, est présentée la démarche suivie pour créer une **base de données spatialisée composée de métriques et d'indicateurs d'état physique du bassin Rhône Méditerranée Corse**. Pour la mettre en place, nous avons utilisé les données vectorielles de la BD Topo[®] de l'IGN. Une phase de prétraitement de ces données brutes (Partie 2.A.2) a été nécessaire pour produire les objets géographiques « eau » et « bande active », qui sont utilisés pour :

- ✓ définir des unités spatiales pertinentes pour l'étude du réseau hydrographique rhodanien, en le sectorisant de manière automatique,
- ✓ extraire des métriques de mesures physiques du corridor fluvial à l'échelle du tronçon,
- ✓ alimenter un Système d'Information Géographique.

1. Sectorisation du réseau hydrographique en Tronçons Géomorphologiques Homogènes (TGH)

Les unités spatiales retenues pour la réalisation de ce travail sont les tronçons géomorphologiques homogènes (ou TGH) (Partie 3.Chapitre 1.B.3.1), que l'on détermine en première instance en fonction de la largeur de la bande active et de celle du fond de vallée (Figure 3.12). En effet, la variabilité longitudinale de la largeur du fond de vallée est un indicateur de l'organisation géologique du bassin, permettant de distinguer notamment les tronçons alluviaux des tronçons non alluviaux. Les sections à chenal unique, étroites pour une taille de bassin versant donnée, s'opposent ainsi à des sections présentant de nombreux bancs à galets, exondés à l'étiage (Wiederkehr et al., 2010b).

1.1. Méthode d'extraction des tronçons géomorphologiques homogènes

Les TGH sont des unités spatiales réagrégées (Partie 2.C.4), qui ont été construits en appliquant un test de Pettitt (Pettitt, 1979). Ainsi, des tronçons homogènes en moyenne en termes de **largeur de bande active**, ou de **largeur de fond de vallée**, ont été identifiés. Chacun de ces objets est utilisé sous la forme d'une couche vectorielle surfacique. La bande active correspond à l'agrégation de deux classes de polygones (les bancs de galets et le chenal en eau) issues de la BD Topo[®]. La couche « fond de vallée » résulte d'une procédure géomatique décrite dans Alber et Piégay (2008).

Afin de faciliter le traitement des données, un paramètre supplémentaire a été pris en compte : l'identifiant rivière (Figure 3.10). L'ajout de ce paramètre permet de satisfaire à l'un des objectifs de cette thèse : en l'occurrence l'automatisation de l'extraction de métriques en améliorant et en facilitant la création des TGH. Cette contrainte provoque une sur-segmentation mais ceci n'est pas un problème en soi car il est en effet plus facile de réagréger des données que de découper de nouveaux segments. De plus, ce critère peut être assimilé à celui de l'ordre de Strahler, qui est

également utilisé comme critère de sectorisation. Andriamahefa (1999) utilise cet indice pour poser des limites de tronçons « lorsqu'un changement d'ordre dans les rangs supérieurs à 3 se caractérisait par une modification notable et irréversible de paramètres morphologiques (sinuosité, largeur du lit mouillé ou du lit majeur) ».

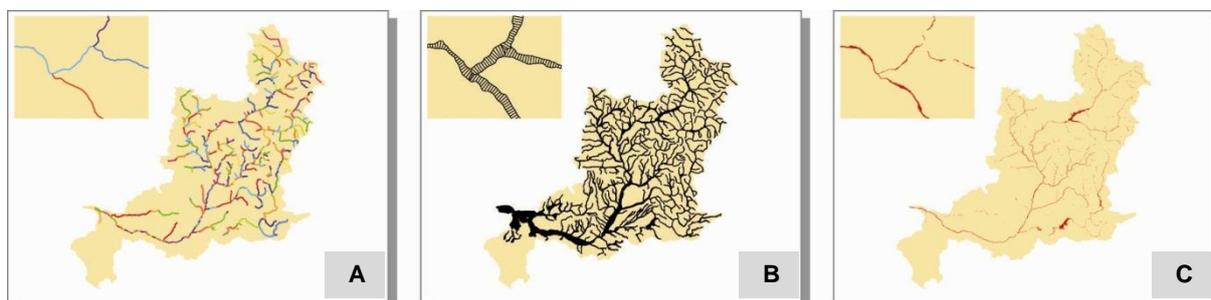


Figure 3.10. Illustration dans le bassin de la Durance des critères utilisés pour la détermination des tronçons géomorphologiques homogènes : identifiants de rivière (A), largeur du fond de vallée (B), largeur de la bande active (C).

1.2. Détermination du réseau hydrographique utilisé pour la base de données spatialisée

Afin d'alléger le jeu de données initial de 47 220 km de cours d'eau (Partie 2.A.2), seuls les segments de cours d'eau dont l'ordre de Strahler est supérieur ou égal à 3 ont été conservés. Pour ce faire, nous avons utilisé le paramètre « ordre de Strahler » disponible à partir du Réseau Hydrographique Théorique du Cemagref (Pella et al., 2012). La sélection s'est faite en intersectant notre réseau à celui des segments RHT d'ordre supérieur à 2, ce qui nous donne un réseau hydrographique allégé, composé de 18 552 tronçons, pour un linéaire de 20 528,11 km.

Méthode pour sectoriser le réseau hydrographique rhodanien en tronçon géomorphologique homogène :

Le référentiel (Partie 2) a été segmenté à chaque confluence à partir de la fonction « *Split polylines* » d'Arc Gis. Chaque segment s'est vu attribuer un identifiant (Figure 3.11). Cet axe a ensuite été segmenté tous les 100 m avant d'être converti en points par la fonction « *Convert polylines* ».

La couche vectorielle qui en découle sert à la construction de polygones de Thiessen.

Ces polygones sont ensuite intersectés d'une part à la couche « bande active » et d'autre part à la couche « fond de vallée ». Pour chacune des unités spatiales ainsi générées, la surface des polygones a été calculée puis divisée par la longueur du segment élémentaire, soit 100 m, afin d'obtenir la largeur moyenne de chacun des polygones. On dispose ainsi pour chaque segment élémentaire d'un identifiant « rivière » et, des largeurs de la bande active et du fond de vallée.

La largeur du fond de vallée est alors segmentée à l'intérieur des segments de rivières à partir du test de Pettitt. À l'intérieur de ces segments, une seconde segmentation est réalisée sur la largeur de la bande active.

Enfin, chacun de ces tronçons géomorphologiques homogènes est renseigné par un identifiant.

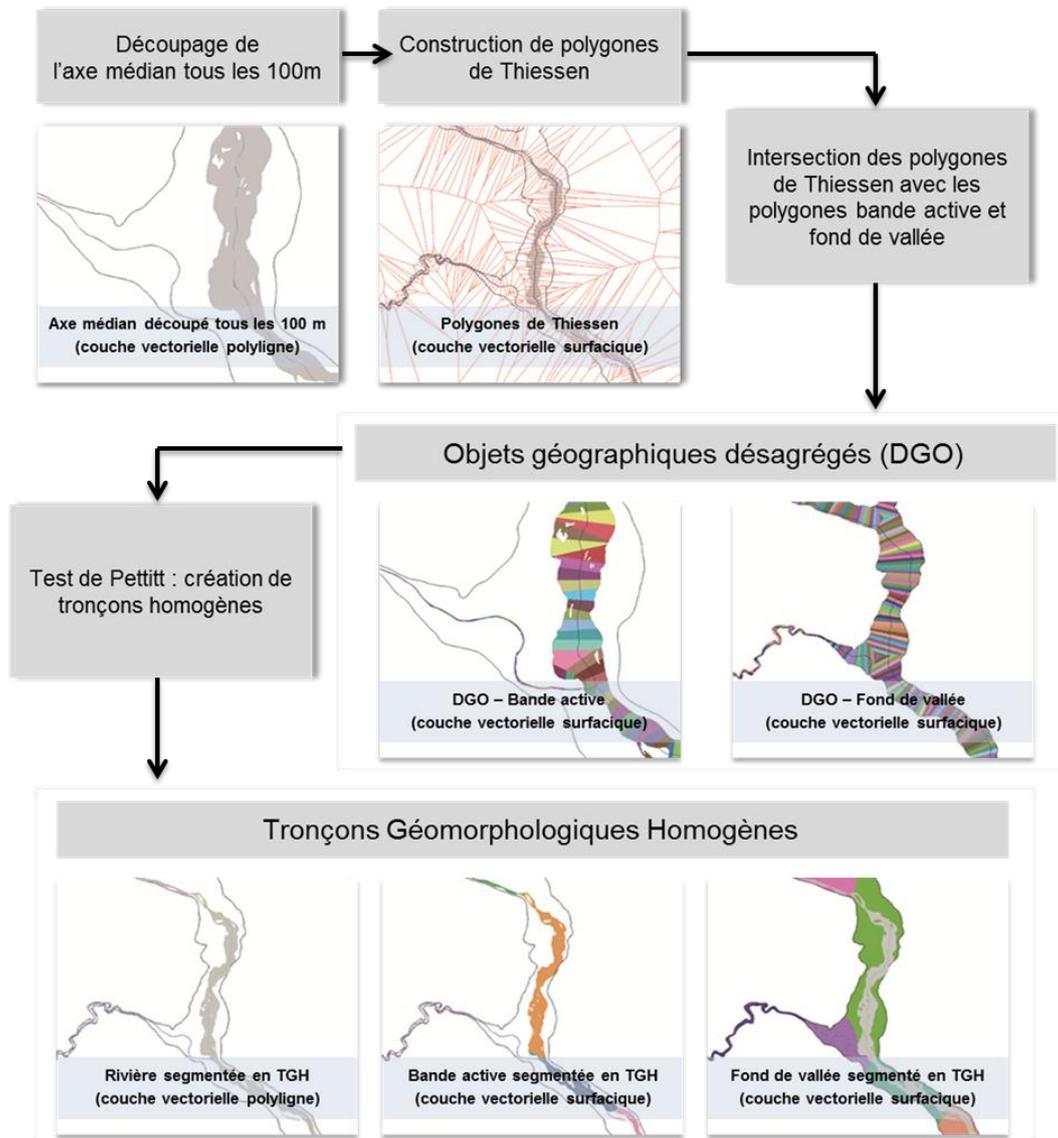


Figure 3.11. Illustration de la méthode utilisée pour construire des tronçons géomorphologiques homogènes sur l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien.

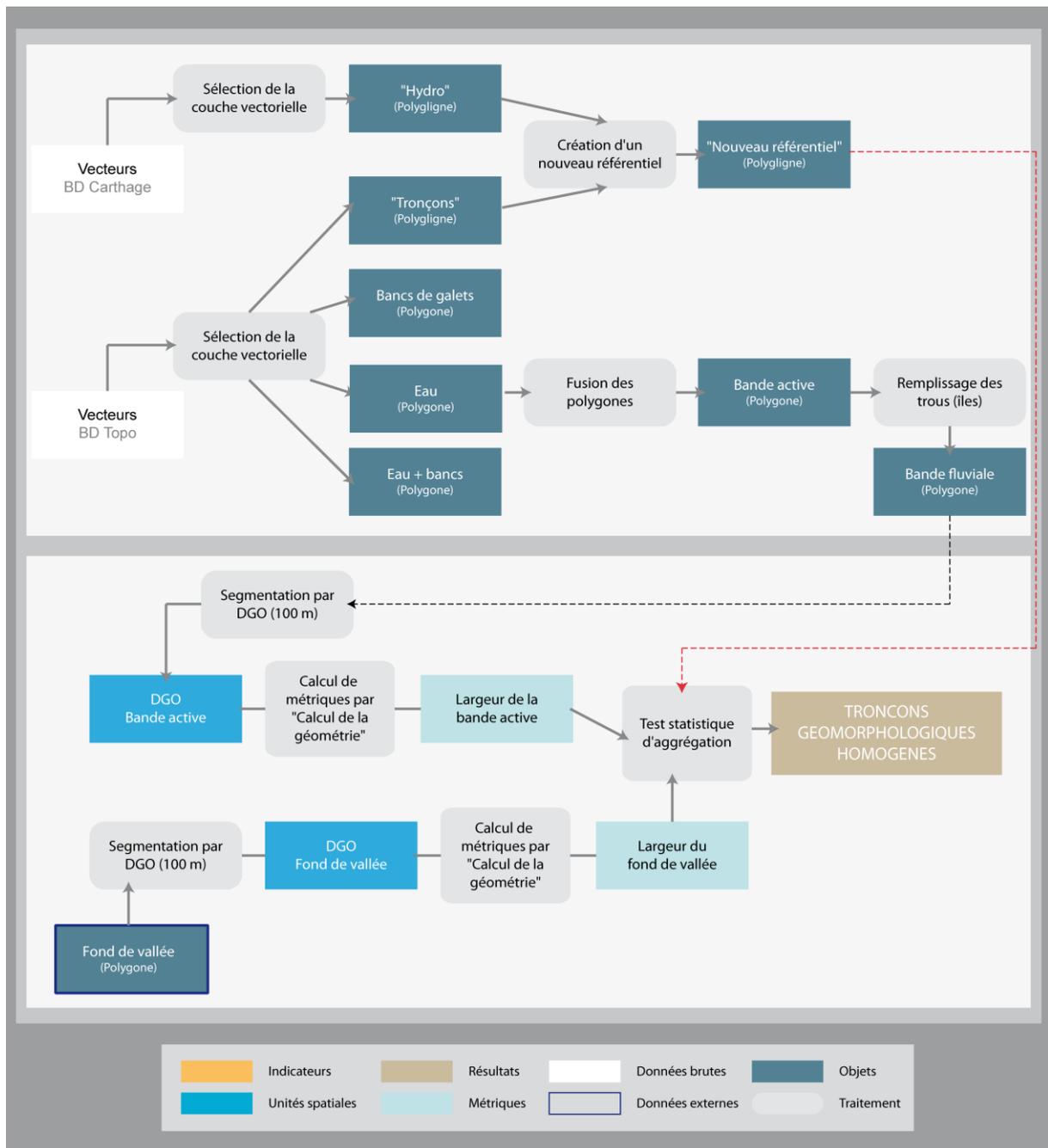


Figure 3.12. Schéma méthodologique : création de tronçons géomorphologiques homogènes à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse.

2. Extraction de métriques par Tronçons Géomorphologiques Homogènes

2.1. Métriques issues de données vectorielles surfaciques et linéaires

Pour chaque tronçon homogène l'outil « *Calcul de géométrie* » d'ArcGis a permis d'évaluer les **surfaces en eau de la bande active et de la bande fluviale**. La **largeur moyenne de la bande active** a été obtenue en divisant sa surface par la longueur du TGH. Quant à la **largeur du fond de vallée**, il s'agit d'une valeur moyenne de l'ensemble des objets géographiques composant le TGH. Les chenaux dont la largeur est inférieure à 7,5 m sont représentés de manière linéaire sur la BD Topo[®], ce qui a pour conséquence que certains tronçons homogènes ne disposent pas d'informations surfaciques. Ils sont catalogués comme des TGH « sans bande active ». Le réseau hydrographique représenté sous la forme d'une polyligne est utilisé pour extraire deux métriques : la **longueur réelle du tronçon** calculée à partir de l'outil « Calcul de géométrie » et la **longueur directe** (à vol d'oiseau) qui sépare les deux extrémités du tronçon (Figure 3.13).

2.1. Métriques issues du Réseau Hydrographique Théorique

Pour étoffer le jeu de métriques, nous avons utilisé la base de données RHT du Cemagref. Cette base a été construite à partir d'un réseau hydrographique étendu (Pella et al., 2008) et de la BD Alti[®] de l'IGN au pas de 50 m. Le réseau est inséré dans le MNT, permettant de prendre en compte l'écoulement. Cela permet d'obtenir « *une meilleure estimation des limites du bassin versant, des surfaces des bassins et de la pente des tronçons* » (Pella et al., 2012). Cette base a été complétée par des attributs environnementaux grâce à la plate-forme Estimkart (Lamouroux et al., 2010). La base RHT présente ainsi des valeurs de débits, de hauteurs d'eau et de probabilité de présence d'espèces piscicoles. La principale difficulté rencontrée est liée au fait que les deux tracés (RHT et TGH) ne se superposent pas exactement et que les extrémités des segments RHT ne correspondent pas à ceux des tronçons homogènes (TGH). Pour réduire au maximum le risque d'erreur lors du transfert d'information de la base RHT aux TGH, nous avons utilisé une zone tampon (ou *buffer*). Pour chaque TGH la moyenne des valeurs issues du RHT a été alors retenue. Après avoir extrait pour chaque TGH l'ensemble des métriques (issues des données vectorielles et du RHT) (Tableau 3.5), nous avons identifié les tronçons non renseignés par (au minimum) une des métriques. Pour ce faire, nous avons listé les erreurs possibles (Tableau 3.4) résultant soit d'incohérences géomatiques lors de l'extraction des métriques calculées à partir des données brutes, soit d'une absence d'information sur le RHT. Ainsi, nous conservons une base de données composées de 13975 TGH.

Tableau 3.4. Liste des erreurs dans l'extraction des métriques.

	Tronçons géomatiques	Linéaire du réseau
	Nombre	Longueur (en km)
Largeur moyenne de la bande active > largeur moyenne du fond de vallée	118	47
Impossibilité de calculer la largeur « ba adim » car Aucune information issue des données RHT	3 856	3 189
Nombre de tronçons inexploitable	4577	3 491
Tronçons exploitables	13 975	17 037

Tableau 3.5. Récapitulatif des métriques extraites par tronçon géomorphologique homogène.

	Nom de la métrique		Données sources	Méthode (le cas échéant)	Type	Unité
Positionnement géographique	Identifiant du Tronçon Géomorphologique RMC	id_tgh_mmc			Texte	Aucune
	Coordonnées X	POINT_X	BDTopo et BD Carthage (ponctuel)	Position X (Lambert 2 étendue) du centre du TGH - fonction "calcul des coordonnées XY"	Réel	
	Coordonnées Y	POINT_Y	BDTopo et BD Carthage (ponctuel)	Position Y (Lambert 2 étendue) du centre du TGH - fonction "calcul des coordonnées XY"	Réel	
	Nom de l'hydroécocorégion	nom_her		Appartenance du centre (point) du TGH - fonction intersection entre HER et point TGH	Texte	Aucune
	Surface de l'hydro-écocorégion	surf_her			Réel	
	Nom du sous-bassin hydrographique	nom_ssbv		Appartenance du centre (point) du TGH - fonction intersection entre sous bassin et point TGH	Texte	Aucune
	Surface du bassin hydrographique	surf_ssbv			Réel	
Métriques issues d'autres bases de données	Largeur moyenne du fond de vallée	m_lrgm_fdv		Moyenne des DGO fond de vallée	Réel	m
	Coefficients a et b pour le calcul du débit biennal	m_coef_a				
		m_coef_b				
Métriques calculées	Largeur moyenne de la bande active	m_lrgm_ba	BDTopo (surfaccique)	Surface de la bande active (en m ²) / Longueur du TGH (en m)	Réel	m
	Longueur du tronçon	m_dist_axe	BDTopo et BD Carthage (linéaire)	Longueur du TGH - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m
	Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon	m_dist_dir	BDTopo et BD Carthage (linéaire)		Réel	m
	Surface du chenal en eau	m_surf_eau	BDTopo (surfaccique)	Surface des polygones eau - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m ²
	Surface de la bande active	m_surf_ba	BDTopo (surfaccique)	Surface des polygones bande active - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m ²
	Surface de la bande fluviale	m_surf_bf	BDTopo (surfaccique)	Surface des polygones bande fluviale - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m ²
	Écart interquartile de la largeur de bande active adimensionnelle	m_eiqba	BDTopo (surfaccique)		Réel	Aucune

	Nom de la métrique		Données sources	Méthode (le cas échéant)	Type	Unité
Métriques issues du RHT	Distance à la source	m_d_source	Topologie du réseau	Parcours du réseau - Pour chaque arc, un programme parcourt le réseau vers l'aval en cumulant les distances des arcs parcourus. Le total représente la distance à la source.		km
	Superficie du bassin versant amont de l'arc	m_surfbv	Superficie des bassins versants unitaires (champ Sfbvu)	Cumul des superficies des bassins versants unitaires amont	Réel	km ²
	Ordre de Strahler	m_strahler		Calculé par un programme de parcours de réseau	Entier	Aucune
	Pente de l'arc	m_pente	Modèle numérique de terrain à 50m de l'IGN	Analyse spatiale par segment - L'altitude du point amont et aval de l'arc est déterminée en interpolant de manière linéaire les altitudes du modèle numérique de terrain à 50 m de l'IGN. La pente est calculée en divisant la différence d'altitude entre l'amont et l'aval par la longueur de l'arc en mètres.	Réel	Pour mille

m_ : métrique / lrgm : largeur moyenne / dist : distance / axe : tronçon / dir : à vol d'oiseau / surf : surface / ba : bande active / bf : bande fluviale / bv : bassin versant

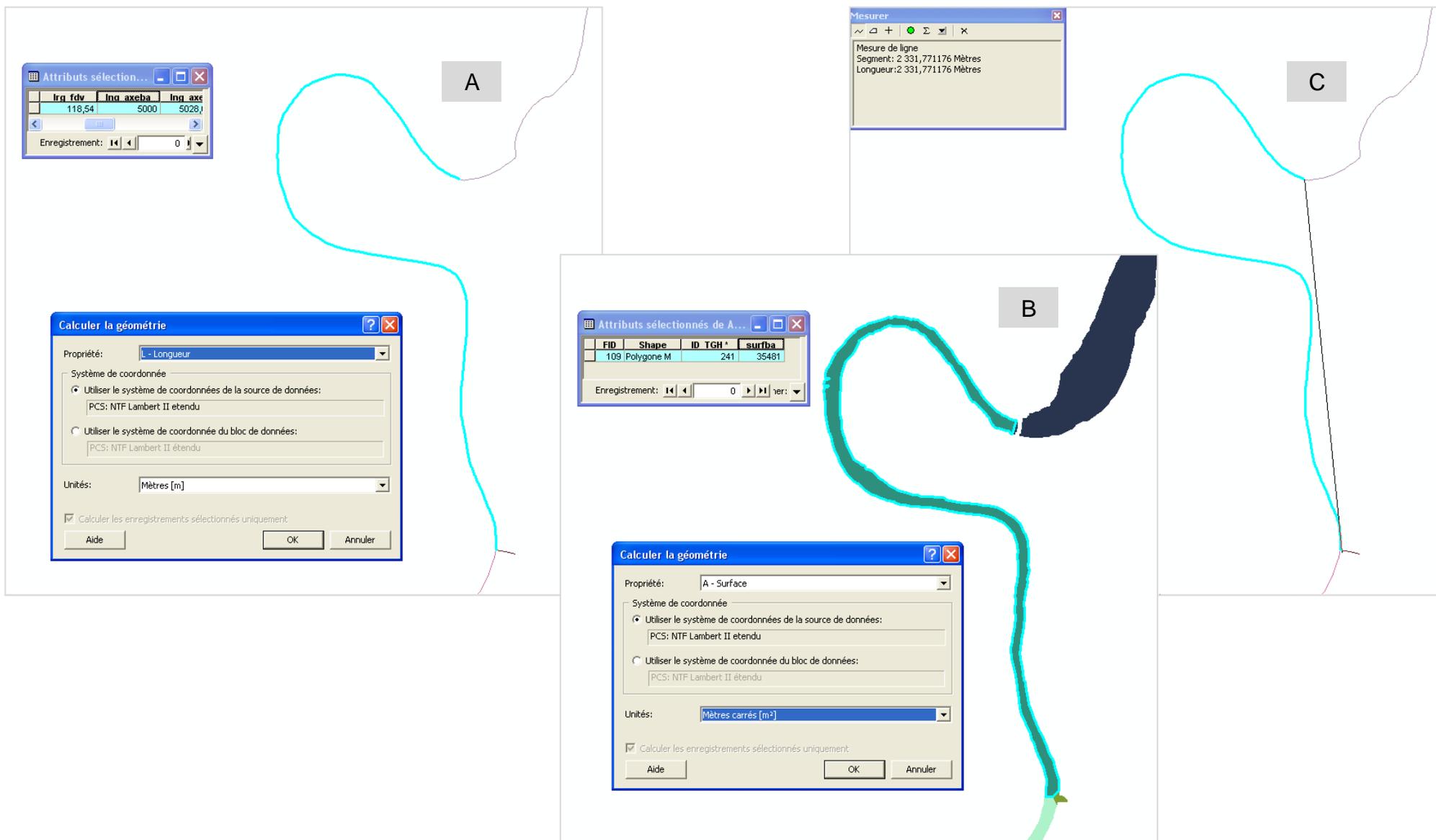


Figure 3.13. Calcul des métriques : à partir d'un polygone, calcul de la surface (B) ; à partir d'une polyligne, calcul de la longueur du tronçon (A) et de la longueur à vol d'oiseau (C).

3. Création d'une base de données spatialisées de mesures physiques du corridor fluvial à l'échelle du bassin RMC

Les couches vectorielles obtenues ont été regroupées en **une base de données géographique**. Il s'agit d'une base composée non seulement d'*informations thématiques* comme toute base de données simple mais également d'*informations spatiales* comme la localisation ou la géométrie de l'objet (Servigne et Libourel, 2006). L'intérêt de la base de données réside en sa capacité à gérer de grandes quantités d'informations en optimisant les actions de stockage, de mise à jour ou d'ajout de données.

Nous avons utilisé sous l'environnement ESRI, une Geodatabase de type fichier, qui permet le stockage des données dans un dossier Windows. Celle-ci est composée de couches vectorielles (ou classes d'entités), et de tables attributaires (Figure 3.15). Les classes d'entités sont regroupées en thèmes sous forme de jeu d'entités (Figure 3.14). Par exemple, nous avons regroupé les données surfaciques des objets élémentaires ensemble, les différentes classes d'entités reprenant les métriques extraites dans un autre jeu de classes d'entités. À l'heure actuelle, notre base de données (Tableau 3.6) ne compte pas de données *rasters* mais il est tout à fait envisageable qu'à terme des orthophotographies la complètent. Les métriques calculées et les indicateurs extraits pour l'élaboration de la typologie régionale, par exemple, sont incorporés à cette base de données.

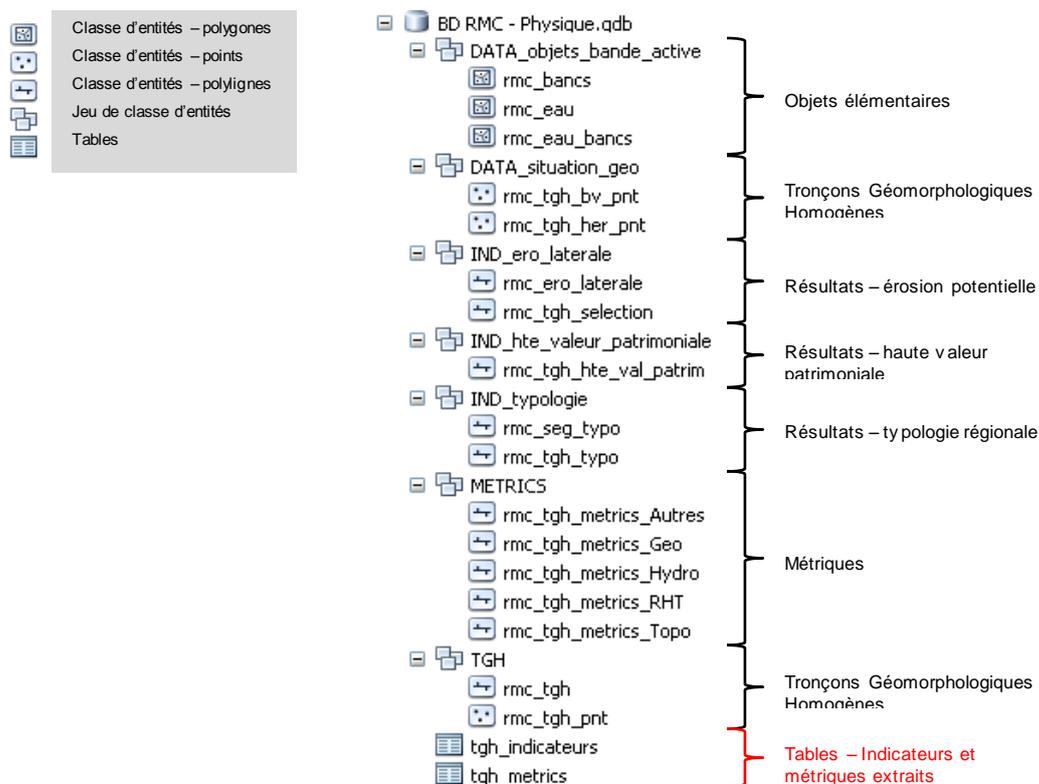


Figure 3.14. Architecture de la base de données de mesures physiques (BD RMC – Physique).

Tableau 3.6. Champs attributaires composant la base de données BD RMC – Physique

Nom du champ	Type de données	Description
a	Réel simple	non renseigné
b	Réel simple	non renseigné
Classes	Texte	Classes des objets de la bande active
id_tgh_rmc	Texte	Numéro de TGH
ind_babf	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Présence ou pas d'îles
ind_conf	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Confinement ou pas
ind_eauba	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Chenal simple ou composite
ind_eiqba	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Homogénéité ou non de la largeur adimensionnelle de la bande active
ind_ero_lat	Réel double	Érosion latérale par TGH (en m/an)
ind_lrgba	Réel double	Indicateur par TGH - Largeur de la bande active adimensionnelle
ind_lrgba	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Nature de la largeur de la bande active
ind_pente	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Nature de la pente
ind_puiss	Réel double	Indicateur par TGH - Puissance brute (en W/m)
ind_q2	Réel double	Indicateur par TGH - Débit biennal (en m ³ /s)
ind_sinu	Texte	Caractéristique de l'indicateur - Nature de la sinuosité
lngmoy_tgh		Longueur moyenne des TGH par types
m_coef_a	Réel double	non renseigné
m_coef_b	Réel double	non renseigné
m_d_source	Réel double	Métrique par TGH - Distance à la source (en km)
m_dist_axe	Réel double	Métrique par TGH - Longueur du tronçon (en m)
m_dist_dir	Réel double	Métrique par TGH - Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon (en m)
m_eiqba	Réel double	Métrique par TGH - Longueur du tronçon (en m)
m_lrgm_ba	Réel double	Métrique par TGH - Largeur moyenne de la bande active (en m)
m_lrgm_fdv	Réel double	Métrique par TGH - Largeur moyenne du fond de vallée (en m)
m_pente	Réel double	Métrique par TGH - Pente de l'arc (en pour mille)
m_strahler	Réel double	Métrique par TGH - Ordre de Strahler
m_surf_ba	Réel double	Métrique par TGH - Surface de la bande active (en m ²)
m_surf_bf	Réel double	Métrique par TGH - Surface de la bande fluviale (en m ²)
m_surf_bv	Réel double	Métrique par TGH - Surface du bassin versant amont de l'arc (en km ²)
m_surf_eau	Réel double	Métrique par TGH - Surface du chenal en eau (en m ²)
NOM	Texte	non renseigné
nom_her	Texte	Nom de l'hydro-écorage
nom_ssbv	Texte	Nom du sous bassin hydrographique
nomSubNet	Texte	non renseigné
OBJECTID	Identifiant d'objet	
OBJECTID_12	Identifiant d'objet	
OBJECTID_1	Identifiant d'objet	
POINT_X	Réel double	Coordonnées X du "centre" du TGH (Lambert 2 étendue)
POINT_Y	Réel double	Coordonnées Y du "centre" du TGH (Lambert 2 étendue)
sel_50m	Réel court	Sélection des TGH pour le modèle d'érosion latérale - A l'intérieur du découpage
sel_conf	Réel court	Sélection des TGH pour le modèle d'érosion latérale - Zone confinée
sel_final	Réel court	Sélection des TGH pour le modèle d'érosion latérale - Tronçons sélectionnés
sel_lrgba	Réel court	Sélection des TGH pour le modèle d'érosion latérale - Bande active présente
sel_nomode	Réel court	Sélection des TGH pour le modèle d'érosion latérale - En dehors du modèle
sel_Rhone	Réel court	Sélection des TGH pour le modèle d'érosion latérale - Rhône
Shape	Géométrie	
Shape_Area	Réel double	Surface de l'objet
Shape_Length	Réel double	Longueur de l'objet
surf_her	Réel double	Surface de l'hydro-écorage
surf_ssbv	Réel double	Surface du sous-bassin hydrographique
Type_potentiel	Réel court	Indique s'il y a une potentialité de diversité d'habitat forte (1) ou pas (2)
Types	Texte	Styles fluviaux – Classes

La base de données est en Lambert 2 étendue. Les couches intermédiaires servant au calcul des métriques n'ont pas été conservées.

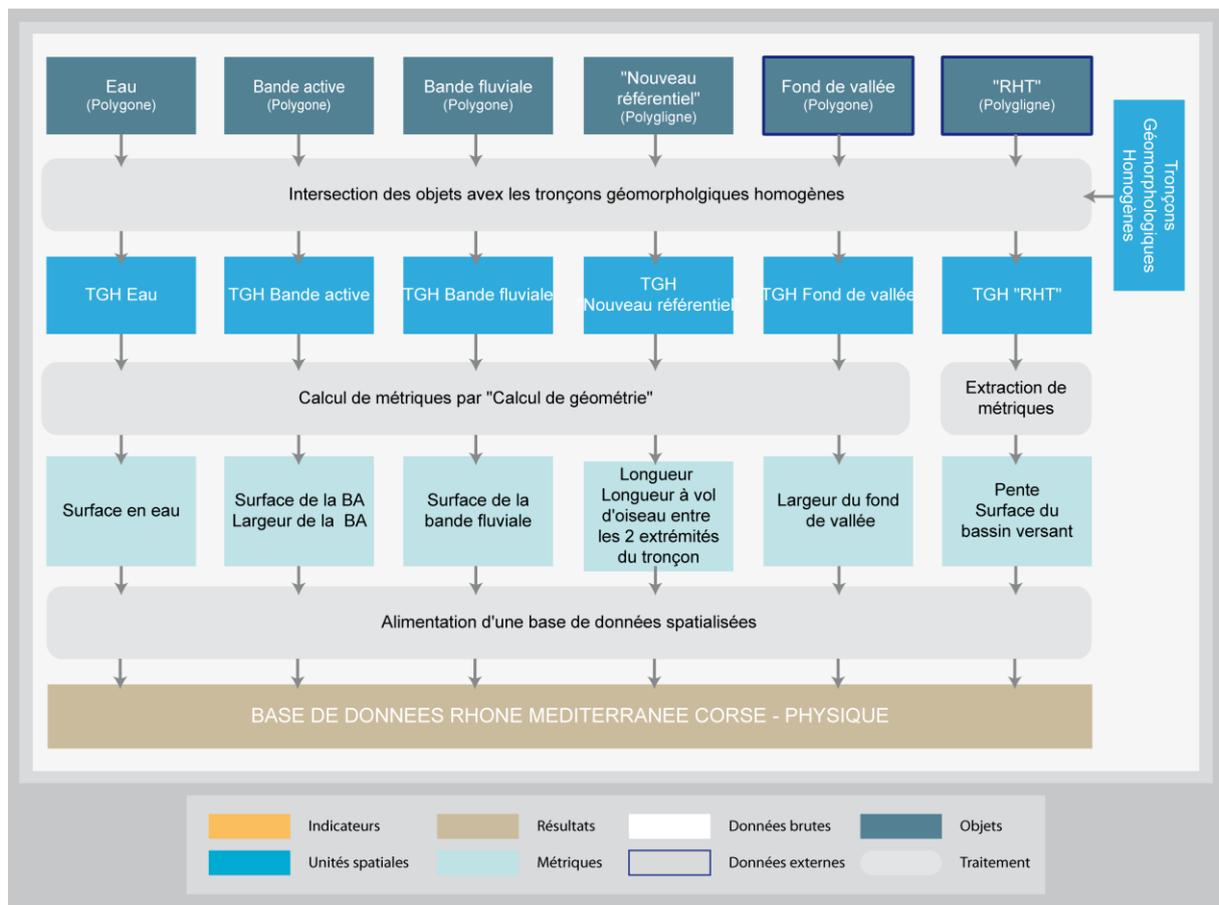


Figure 3.15. Schéma méthodologique : création d'une base de données de mesures physiques à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse (liste des métriques non exhaustive).

C. Exemples d'utilisation de la base de données spatialisée de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse

Dans cette section, trois exemples d'utilisation de la base de données sont présentés (Figure 3.16). Tout d'abord, nous définissons une **typologie régionale** des styles fluviaux. Celle-ci sert ensuite à cibler les secteurs potentiellement à **forte diversité d'habitats**, ce qui induit un besoin de préservation de ces zones. Puis l'interrogation de la base de données permet d'identifier des **tronçons dont l'érosion latérale est potentiellement forte**.

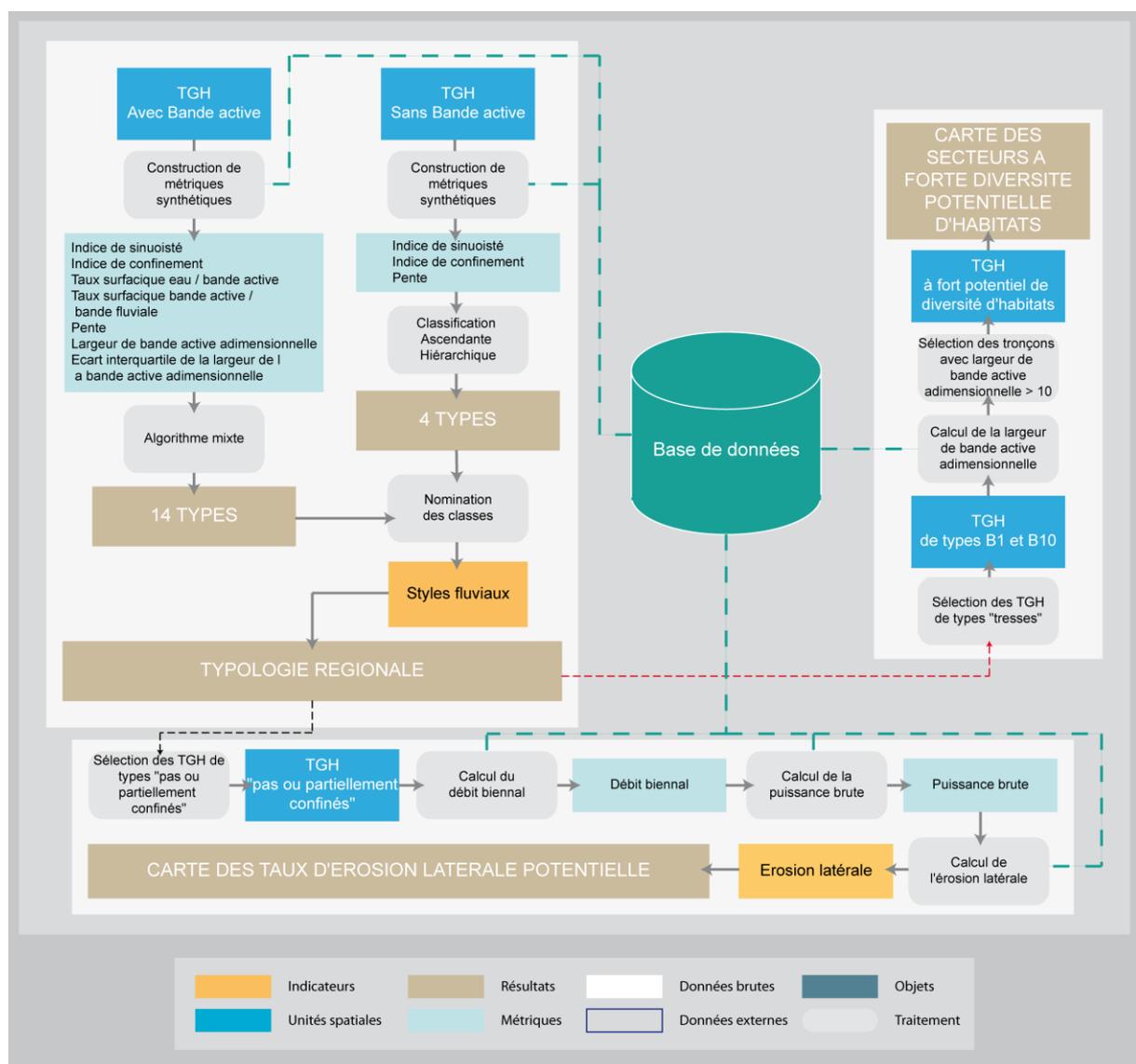


Figure 3.16. Schéma méthodologique : utilisation de la base de données de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse.

1. Typologie régionale de la morphologie des cours d'eau

Le principal objectif de cette section est de définir une typologie à partir d'indicateurs géomorphologiques à l'échelle du réseau hydrographique du bassin RMC. Comme le rappellent Malavoi et Bravard (2010), le style fluvial fait partie des variables de réponses « *dont dispose un cours d'eau naturel ou peu aménagé pour s'ajuster aux variations des paramètres de contrôle* ». De fait, la détermination des styles fluviaux constitue un enjeu de gestion important car le style est à la fois un indicateur de fonctionnement et d'anthropisation. Le style se définit généralement par des paramètres tels que le nombre de bras en eaux, la sinuosité, la pente,

La démarche typologique repose sur plusieurs étapes.

- ✓ Le recueil des données pertinentes et cohérentes sur l'ensemble du bassin pour définir la structure morphologique des cours d'eau. Les variables retenues sont évaluées par tronçons géomorphologiques homogènes.
- ✓ La mise en place d'une typologie à l'échelle du réseau hydrographique rhodanien.
- ✓ L'interprétation des résultats afin d'avoir une vue d'ensemble des différents types fluviaux rencontrés sur le bassin RMC.

1.1. Méthode

1.1.1. Les paramètres de classification

Plusieurs métriques synthétiques ont été créées à partir des métriques disponibles dans la base de données.

- ✓ La **pente**, qui permet d'avoir une idée de « *l'énergie potentielle du cours d'eau et de sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments* » (Malavoi et Bravard, 2010). Comme le souligne Souchon et al. (2000), il s'agit d'une métrique déterminante pour comprendre le fonctionnement morphologique du cours d'eau et de son style fluvial. C'est le seul indicateur qui n'est pas planimétrique. Il est important car il régit en grande partie la sensibilité d'un style au changement. Les rivières à méandres de piémont à plus forte pente que les rivières à méandres de plaine présentent ainsi une mobilité en plan plus importante qui explique qu'il soit utile de les distinguer même si leur planimétrie est finalement assez proche.
- ✓ L'**indice de sinuosité**, qui résulte d'un équilibre entre la pente de la vallée et la charge solide transportée par la rivière (Souchon et al., 2000). Il est calculé en faisant le rapport entre la longueur de l'axe médian et la longueur à vol d'oiseau par tronçon :
 - Les chenaux rectilignes, dont l'indice est inférieur à 1,05.
 - Les chenaux sinueux, dont l'indice est compris entre 1,05 et 1,25.
 - Les chenaux très sinueux, dont l'indice est compris entre 1,25 et 1,50.
 - Les chenaux méandriformes, dont l'indice est supérieur à 1,50.
- ✓ Le **taux de confinement**, qui permet d'identifier les secteurs où le cours d'eau peut ou non potentiellement se déplacer latéralement.

- ✓ La **largeur de la bande active (adimensionnelle)** rapportée à la taille du bassin puissance 0,47. Cet indicateur ne rend pas compte de la taille mais de la disponibilité sédimentaire en identifiant les secteurs présentant des surlargeurs (Piégay et al., 2009).
- ✓ Le **taux surfacique eau / bande active**. Un faible rapport eau / bande active indique un secteur dont la bande active est dominée par les dépôts sédimentaires au détriment du chenal en eau. Ce taux permet par exemple de détecter les zones en tresses. Ce paramètre doit être pris en compte avec attention. En effet, il dépend du régime hydrologique. Il faut donc bien faire en sorte que sur l'ensemble du réseau hydrographique les objets composant la « bande active » soient extraits à la même période pour permettre son interprétation intra-bassin.
- ✓ Le **taux surfacique bande active / bande fluviale**, qui permet de mettre en évidence les secteurs avec des îles végétalisées.
- ✓ L'**écart interquartile de la largeur de bande active adimensionnelle** (en fonction de la surface du bassin versant) pour chaque TGH. Cet indicateur permet de distinguer les tronçons homogènes en termes de largeur adimensionnelle de ceux qui ne le sont pas.

Les métriques (Tableau 3.7) extraites à partir de données surfaciques ne sont pas utilisées pour caractériser les secteurs où la BD Topo[®] ne donne qu'une représentation linéaire.

Tableau 3.7. Métriques utilisées pour la mise en place de la typologie régionale.

Indicateurs	Métriques utilisées	Calcul (le cas échéant)
Pente	Pente (m_pente)	
Indice de sinuosité	Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon (m_dist_dir) Longueur du tronçon (m_dist_axe)	m_dist_dir / m_dist_axe
Indice de confinement	Longueur du tronçon (m_dist_axe) Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon (m_dist_dir) Largeur moyenne du fond de vallée (m_lrgm_fdv)	$(m_dist_axe - m_dist_dir) / m_lrgm_fdv$
Largeur de la bande active adimensionnelle	Largeur de la bande active Surface du bassin versant (m_surfbv)	$Largeur\ de\ la\ bande\ active / (m_surfbv)^{0.47}$
Taux surfacique eau / bande active	Surface du chenal en eau (m_surfeau) Surface de la bande active (m_surfba)	$m_surfeau / m_surfba$
Taux surfacique bande active / bande fluviale	Surface de la bande active (m_surfba) Surface de la bande fluviale (m_surfbf)	m_surfba / m_surfbf
Écart interquartile de la largeur de bande active	Largeur adimensionnelle de la bande active par DGO	Calcul de l'écart interquartile par TGH

1.1.2. Traitement et analyse des données ...

Le jeu initial de données (13975 TGH / 17037 km) a été divisé en deux sous-ensembles selon **la présence** (10053 TGH / 13168 km) **ou non de polygones de bande active**⁷ (3922 TGH / 3870 km). Rappelons que le calcul de métriques à partir d'objets surfaciques n'est pas possible sur les tronçons étiquetés sans bande active.

Pour identifier statistiquement les styles fluviaux, nous avons eu recours à une méthode de classification (Partie 1.A.1.3). L'objectif est d'identifier pour chaque TGH une classe ; chacune regroupant des tronçons similaires ou proches en termes de style fluvial. Pour y parvenir, quatre étapes sont nécessaires. La première consiste à *préparer les données* pour les rendre exploitables et minimiser le plus possible les « interférences » liées aux valeurs extrêmes. Puis la seconde est la *mise en place d'une analyse statistique* permettant d'établir des classes en fonction des métriques. Suit une troisième étape qui consiste à *attribuer à chaque classe un type* correspondant à une réalité *morphologique*. Et enfin l'étape de validation qui va nous permettre d'obtenir un *indice de confiance* quant à la pertinence de cette typologie.

a) ... des tronçons géomorphologiques homogènes « sans bande active »

Trois métriques ont été retenues pour déterminer les styles fluviaux des 3922 TGH sans bande active : la pente, les indices de confinement et de sinuosité. L'étape de préparation des données consiste à décrire la distribution statistique de chaque série de données afin de voir si elles répondent à l'hypothèse de normalité. Dans le cas contraire, nous opérons une transformation afin que la série suive une distribution normale. La normalité des données a été évaluée par une approche graphique en utilisant trois modes de représentation :

1. l'histogramme de distribution des données qui permet d'observer la distribution statistique en lui superposant une loi normale, sous forme de courbe. Plus cette courbe s'approche de la cime de l'histogramme plus notre distribution s'approche d'une distribution normale,
2. la boîte à moustaches, qui en cas de symétrie montre que la loi normale se vérifie,
3. la distribution des quantiles, qui consiste à comparer l'échantillon observé avec celui d'une distribution théorique.

⁷ La présence ou non de polygones de bande active renvoie à la possibilité d'extraire à partir des données de la BD Topo® des données surfaciques. Les secteurs où le cours d'eau a une largeur inférieure à 7,5 m ne sont représentés que de manière linéaire.

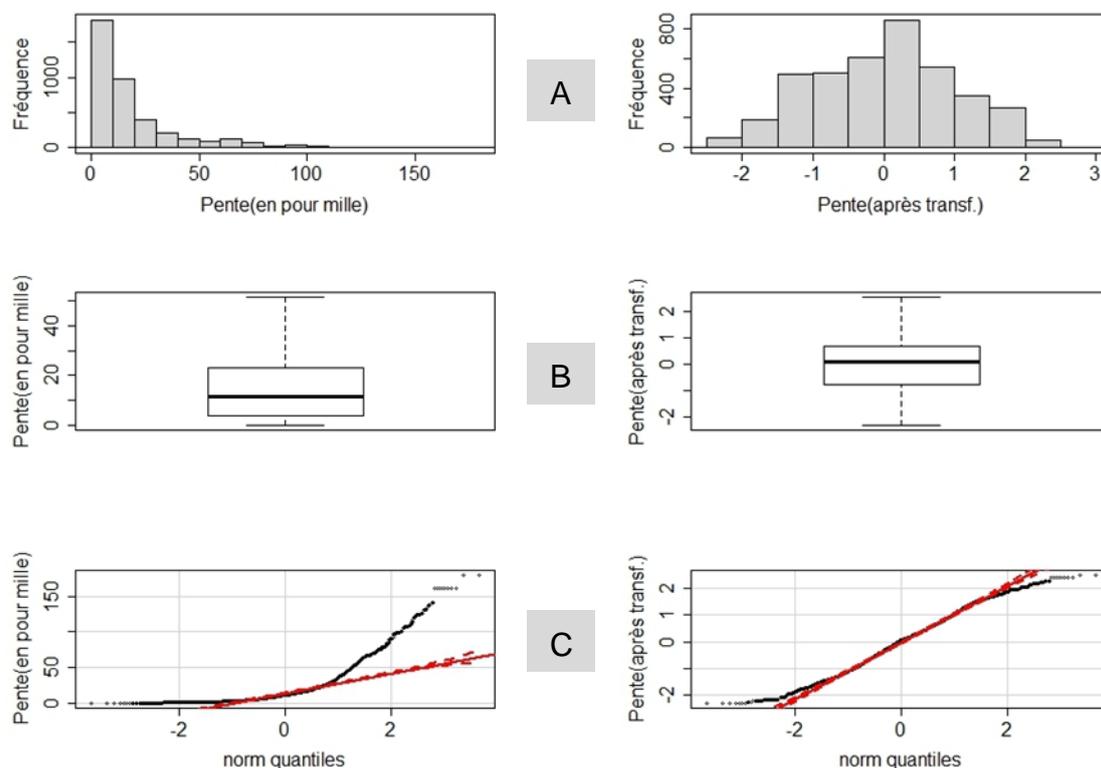


Figure 3.17. Exemples de variables avant et après transformation de Box Cox
 A : histogramme / B : box plot / C : distribution des quantiles.

Pour chaque paramètre sélectionné, nous avons construit ces trois graphiques (Figure 3.17). Lorsque l'observation de ces graphiques infirme l'hypothèse de normalité, les données sont transformées. Trois types de transformations pour normaliser les données ont été testés : les transformations logarithmiques, racine ou de Box-Cox. Il en résulte que les meilleurs résultats sont obtenus avec la transformation de Box-Cox. Cette transformation non linéaire repose sur la formule générale suivante (Équation 3.1) :

Équation 3.1. Équation de Box Cox.

$$B(x, \lambda) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{quand } \lambda \neq 0 \\ \log(x) & \text{quand } \lambda = 0 \end{cases}$$

X doit être positif

Pour identifier l'exposant gamma (x), nous avons utilisé la fonction `powerTransform()` sur le logiciel R. Une fois ces données transformées, nous avons vérifié l'appartenance à la loi normale de chaque nouvelle variable par la méthode des graphiques. Cette procédure ne permet pas d'obtenir systématiquement une distribution normale des données mais elle permet d'obtenir des résultats se rapprochant au plus d'une distribution normale. Afin d'homogénéiser le poids des variables et de leur variation dans la détermination des types, nous les avons également centrées et réduites. Cette transformation rend les données indépendantes de l'unité, leur moyenne étant égale à 0 et leur écart-type à 1. Pour effectuer ce changement, nous avons appliqué la formule suivante (Équation 3.2) :

Équation 3.2. Calcul permettant de centrer-réduire les variables.

$$\frac{V - m}{\sigma}$$

Avec V : variable, m : moyenne et σ : écart-type

b) ... des tronçons géomorphologiques homogènes « avec bande active »

Les TGH dits « sans bande active » ont été catégorisés en quatre classes à partir de trois facteurs. Pour les TGH « avec bande active », quatre critères supplémentaires ont été introduits : la largeur de bande active adimensionnelle, les taux surfacique eau / bande active et bande active / bande fluviale, et l'écart interquartile calculé pour la largeur de bande active adimensionnelle par TGH.

Comme précédemment, les données ont été transformées par la formule de Box-Cox puis centrées-réduites. Compte tenu du nombre d'individus, il n'a pas été possible d'exécuter une simple classification ascendante hiérarchique. En effet, avec plus de 10 000 tronçons, la matrice de données est trop importante pour être traitée telle quelle. Il a donc été nécessaire d'exécuter une étape pour réduire le volume de données préalablement à la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Pour cela, un algorithme mixte en deux étapes a été utilisé. Tout d'abord, une étape de partitionnement est mise en place en utilisant un algorithme de type CLARA, puis une classification automatique est appliquée.

Nous avons un tableau de données composé de plus de 10 053 individus caractérisés par sept variables centrées-réduites. La réduction du jeu de données a été réalisée par un *algorithme de type partitionnement*. Il s'agit de classer N objets en k -partitions. L'objectif est de créer k partitions et d'effectuer des corrections jusqu'à l'obtention d'une similarité satisfaisante, c'est-à-dire de réduire au maximum la similarité interclasses et de maximiser la similarité intra-classes. La méthode de partitionnement sélectionnée, l'algorithme CLARA (Clustering LARge Applications) est de type k -medoids. Cet algorithme est développé par Kaufman et Rousseeuw (1990). Il s'effectue en deux temps. Dans une première étape, les TGH sont partitionnés. Il faut paramétrer le nombre de classes dans l'algorithme. Dans notre cas, le nombre de 300 a été choisi. En deçà, le nombre de classes semble insuffisant et au-delà le traitement algorithmique est trop lourd pour l'ordinateur dont nous disposons. Dans une seconde étape, chaque TGH est affecté à une de ces classes.

1.2. Résultats

1.2.1. Classification ascendante hiérarchique sur les TGH « sans bande active »

Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée sur les trois variables retenues (pente, sinuosité et confinement) afin de répartir l'ensemble des TGH en plusieurs sous-ensembles les plus homogènes possibles. La classification hiérarchique donne comme résultat une hiérarchie des classes, c'est-à-dire que deux individus peuvent être regroupés à un niveau donné et être séparés au niveau inférieur. La méthode de Ward a été choisie. Son principe est de « *regrouper à chaque pas deux éléments en maximisant la qualité de la partition obtenue* » (Husson et al., 2009). L'algorithme *hclust* du logiciel R a été utilisé et le nombre de sous-ensembles (ici 4) a été déterminé à partir du dendrogramme (Figure 3.18).

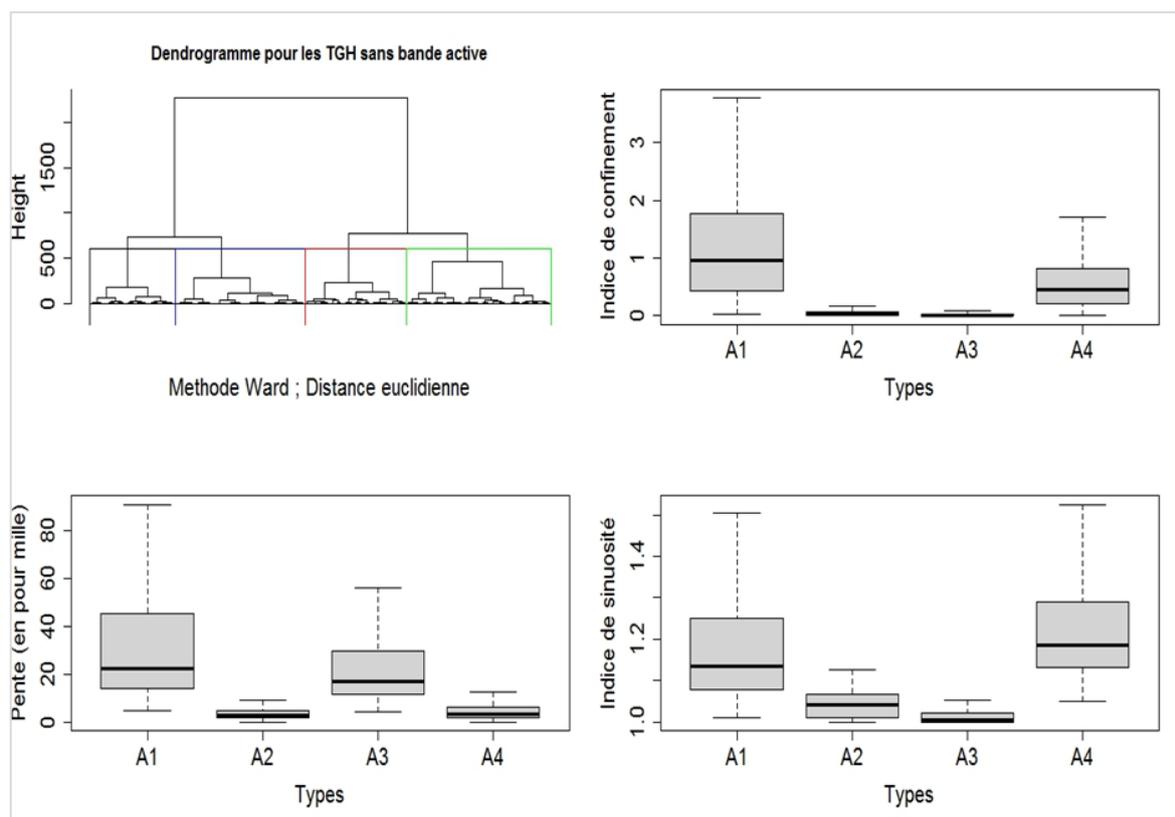


Figure 3.18. Résultat de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH sans bande active caractérisés par 3 indicateurs géomorphologiques.

1.2.2. Classification ascendante hiérarchique sur les TGH avec bande active

Le jeu de données initiales composé de 10 053 TGH a été transformé en une matrice de 300 individus (classes obtenues par la méthode de partitionnement) croisés à sept variables quantitatives. De cette matrice, une classification ascendante hiérarchique (Figure 3.19) a été réalisée et 14 classes ont été retenues.

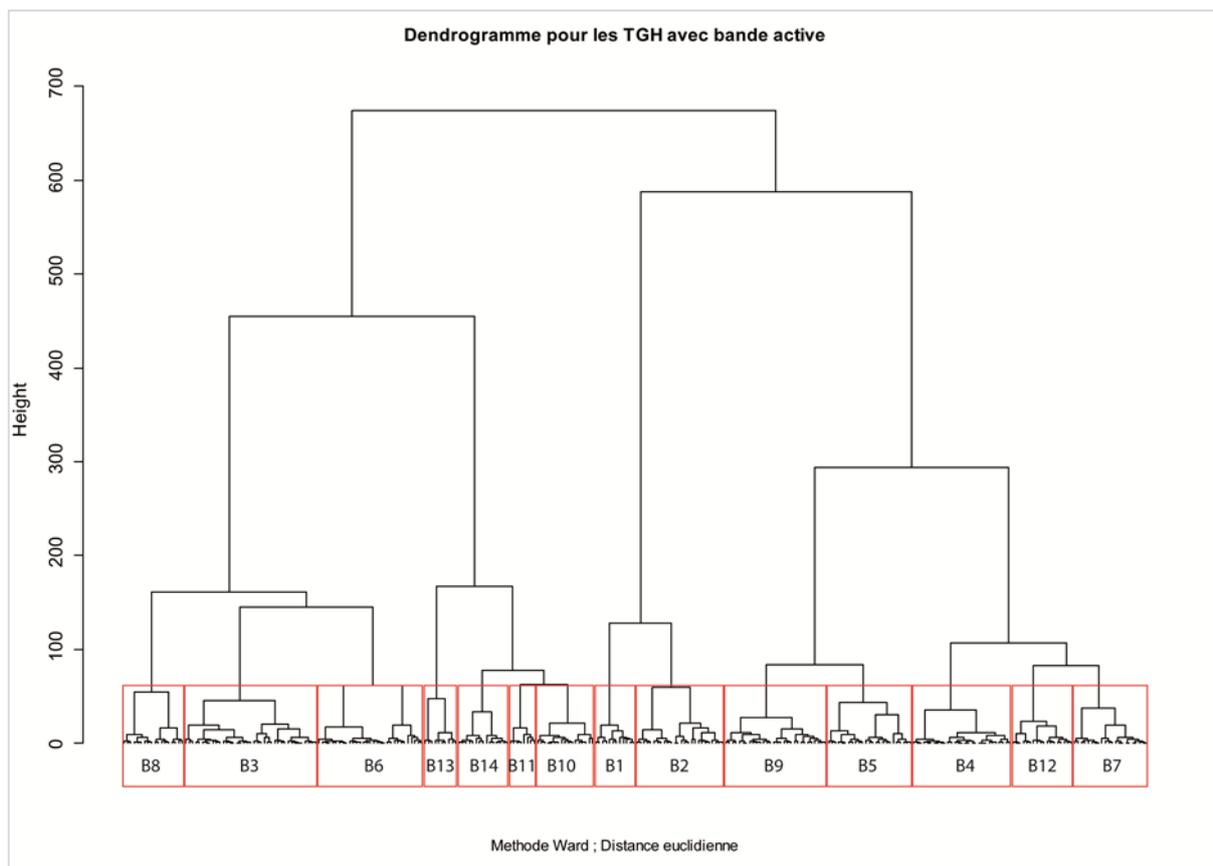


Figure 3.19. Résultats de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH avec bande active.

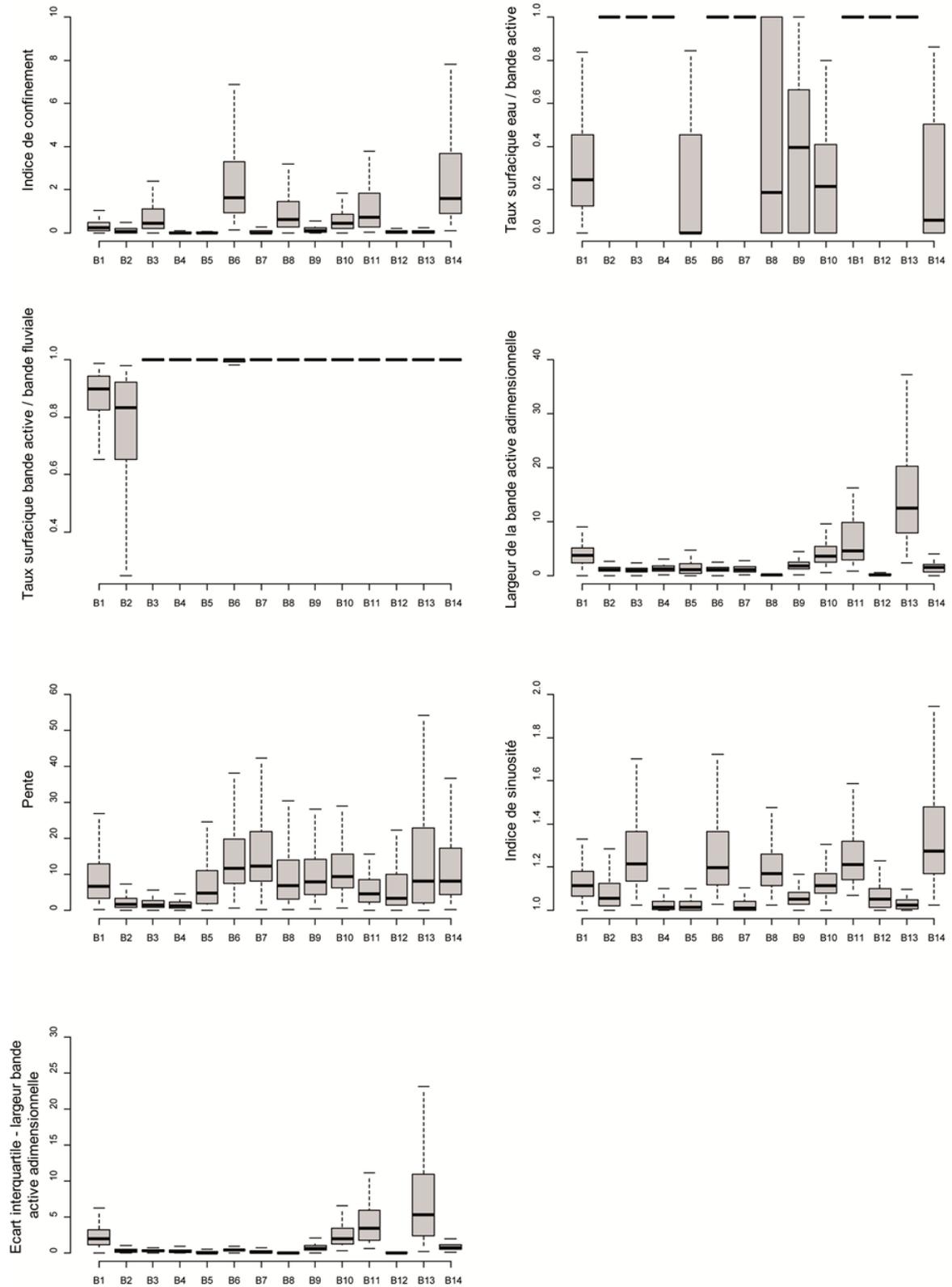


Figure 3.20. Caractérisation des styles fluviaux par les sept métriques utilisées pour déterminer les types morphologiques des tronçons « avec bande active ».

1.2.3. Identification des styles fluviaux à l'échelle du bassin RMC

Nous obtenons une typologie de 18 classes (4 pour les TGH « sans bande active » et 14 pour les TGH « avec bande active »), auxquelles nous attribuons une signification géomorphologique. Pour cela, nous adoptons une méthode experte. Il s'agit d'identifier les types morphologiques non plus de manière automatique mais en nous aidant de nos connaissances scientifiques. Nous avons procédé en plusieurs étapes :

- ✓ observation des valeurs médianes et moyennes par classe de chaque indicateur (Figure 3.20 et Figure 3.21),
- ✓ identification visuelle des seuils permettant de former des groupes pour chaque indicateur. Pour la pente, par exemple, nous avons créé trois groupes : pente faible, modérée ou forte.
- ✓ attribution d'un nom à chaque groupe (exemple : confinés, partiellement confinés ou peu confinés).

Il ressort de cette typologie, trois groupes principaux (Figure 3.22).

- ✓ Les **bandes actives composites**, qui sont les tronçons comprenant à la fois de l'eau et des bancs de galets à des degrés différents : chenaux en tresses ou chenaux en eau à bancs alternés sur 3886 km (2926 TGH) (Figure 3.23).
- ✓ Les **petits systèmes**, qui correspondent aux tronçons sans bande active (identifiables à partir des données vectorisées de l'IGN) et représentent 3870 km (3922 TGH) (Figure 3.24).
- ✓ Les **bandes actives simples**. Il s'agit des tronçons dominés par un type d'objet : soit uniquement de l'eau, soit, plus rarement, des bancs de galets, répartis sur un linéaire de 9282 km (7627 TGH) (Figure 3.25 et Figure 3.26).

Chacune des classes a été décrite selon ses critères morphologiques, en s'intéressant d'abord aux indices de confinement et de sinuosité, puis de la pente pour l'ensemble des TGH. Pour les TGH « avec bande active », nous avons fait une distinction entre les classes en utilisant les indicateurs de largeur. Et ensuite nous avons nommé ces classes en fonction de leurs principales caractéristiques.

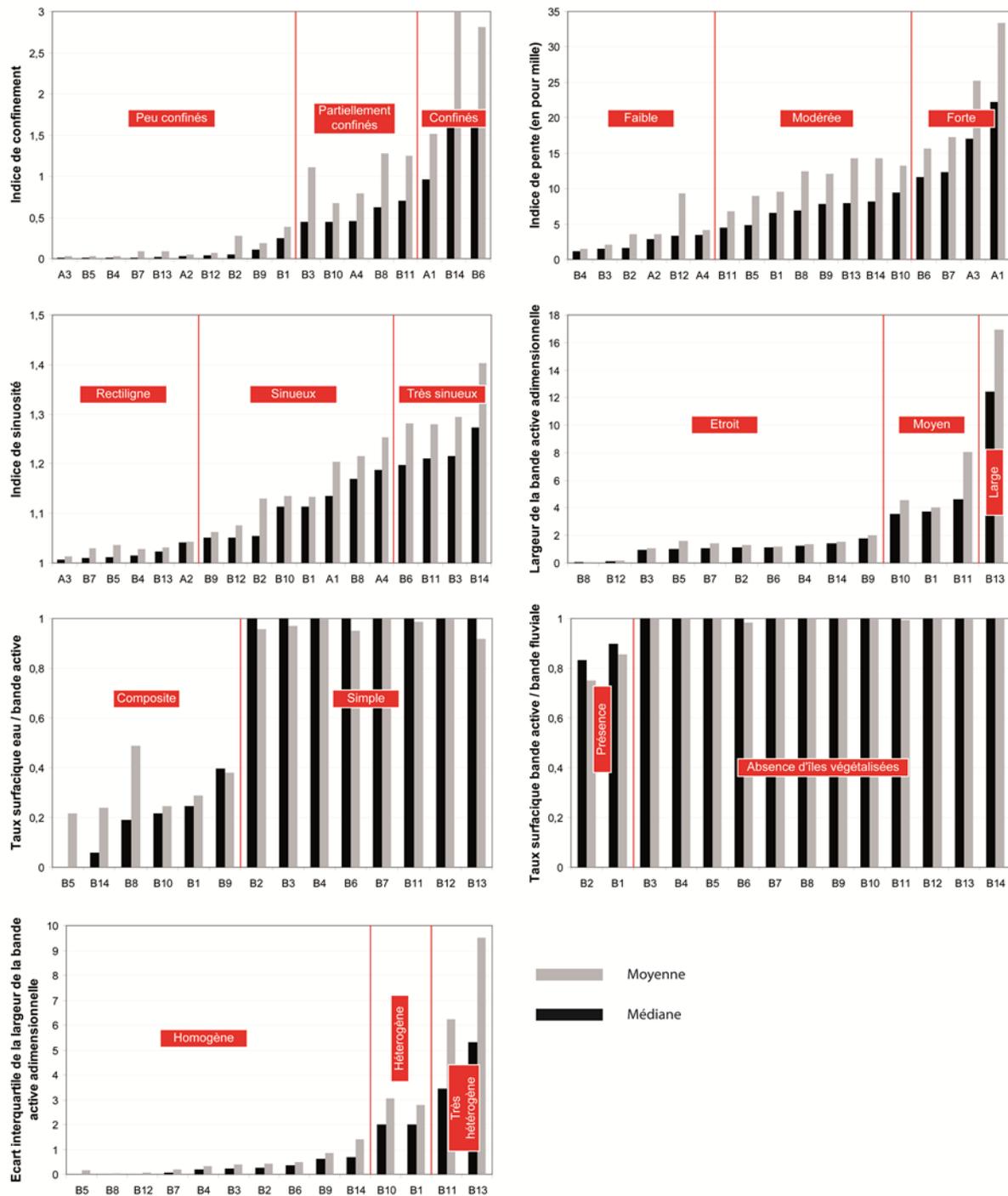


Figure 3.21. Valeurs médianes et moyennes par TGH des indicateurs par classes. A 'num' : tronçons « sans bande active » et B 'num' : tronçons « avec bande active »

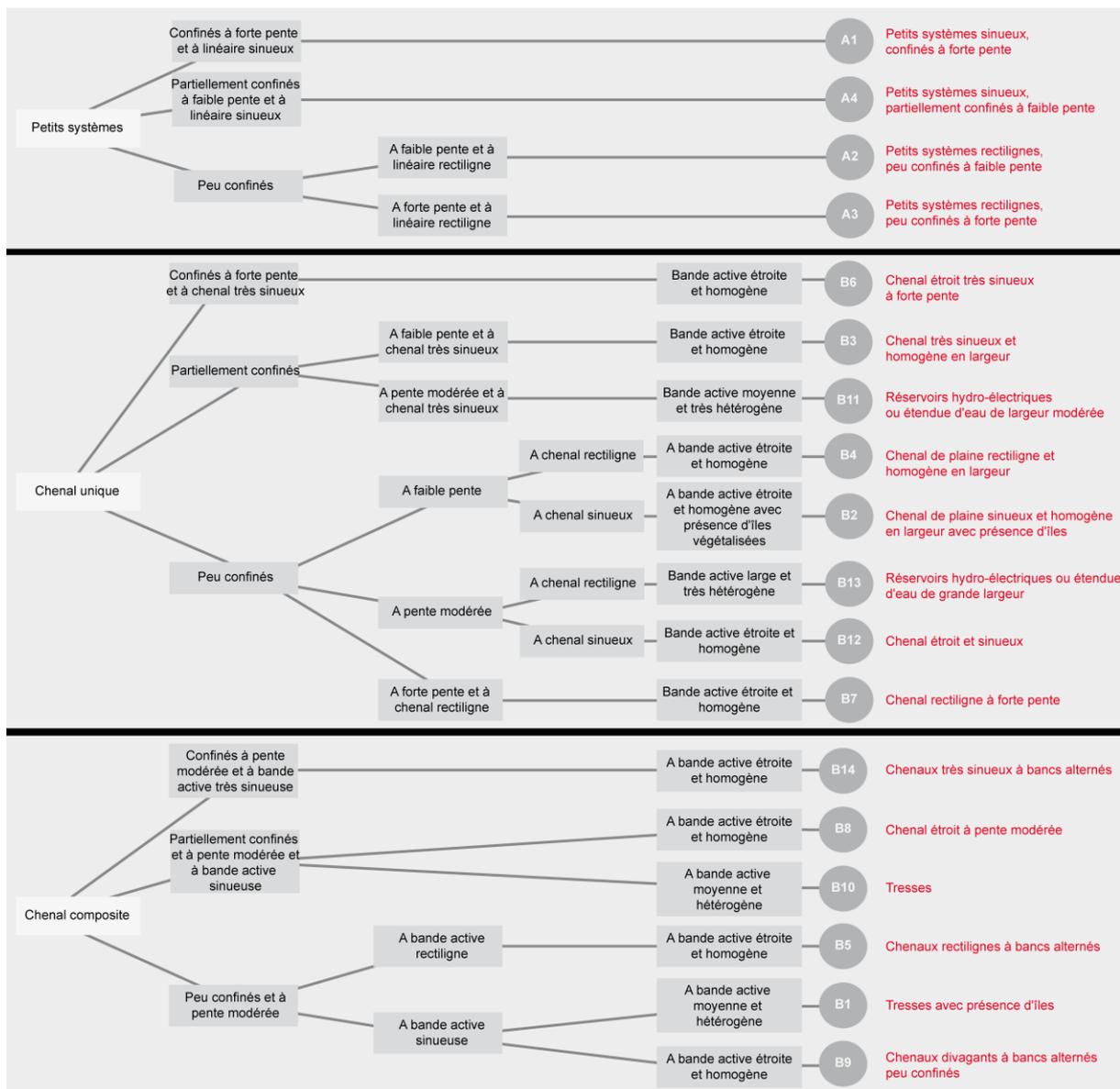


Figure 3.22. Récapitulatif de la typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse.

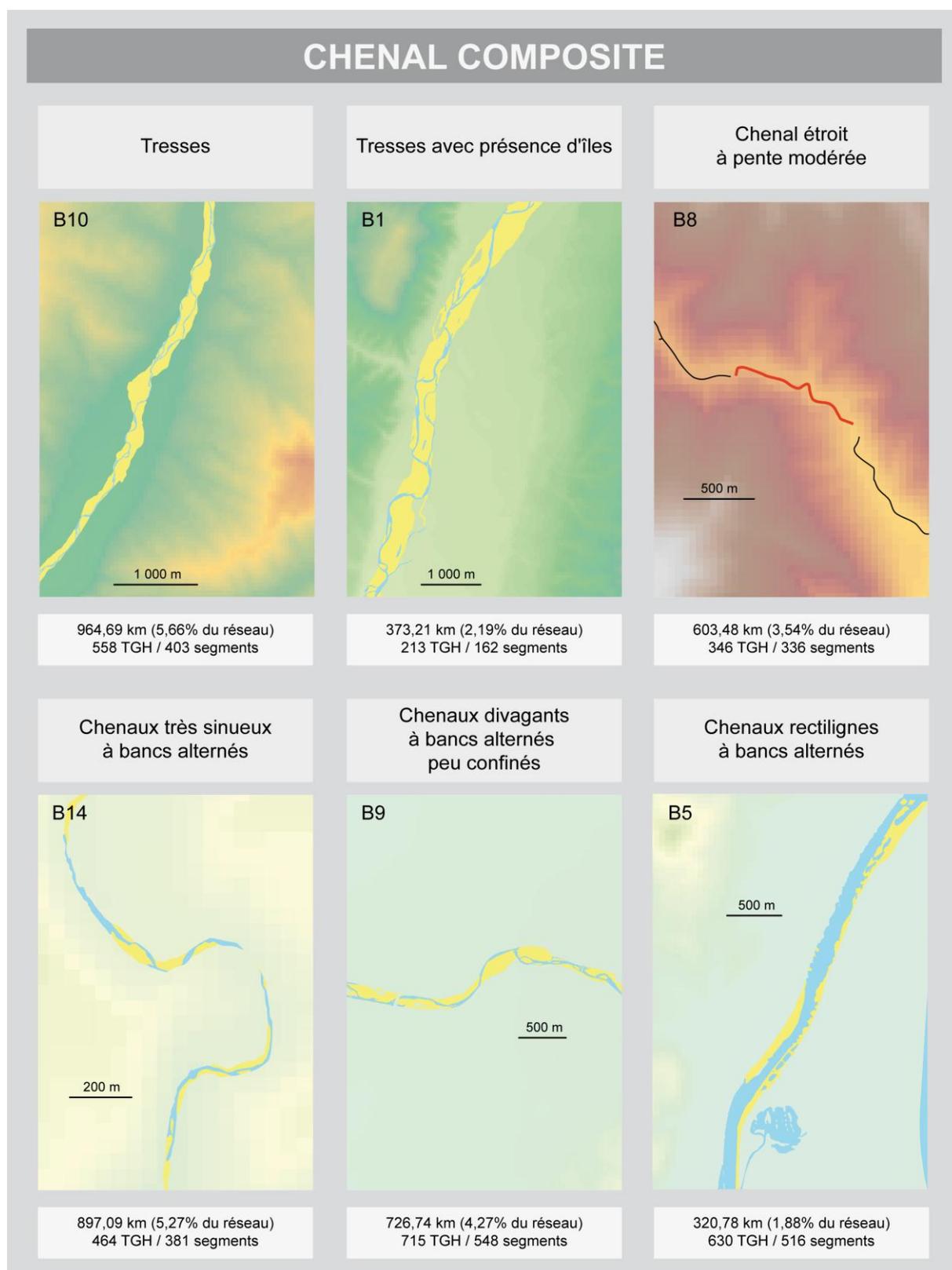
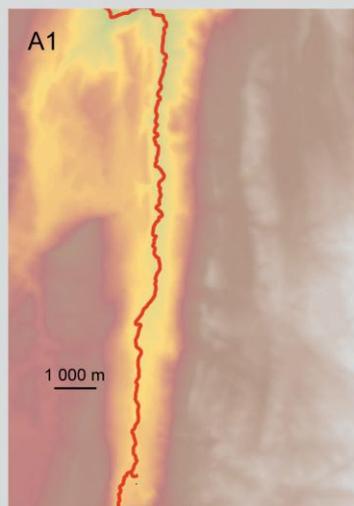


Figure 3.23. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Chenaux composites.

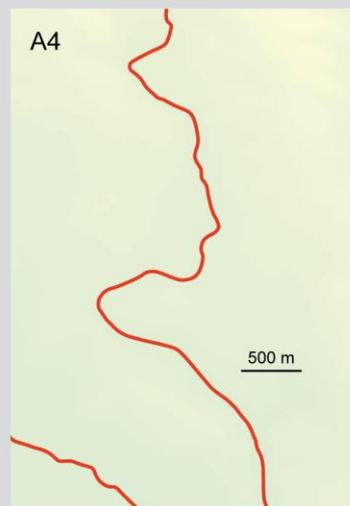
PETITS SYSTEMES

Petits systèmes sinueux,
confinés à forte pente



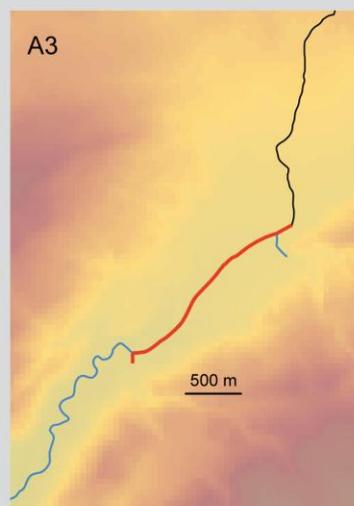
1448,89 km (8,50% du réseau)
1228 TGH / 986 segments

Petits systèmes sinueux,
partiellement confinés
à faible pente



1551,75 km (9,11% du réseau)
859 TGH / 596 segments

Petits systèmes rectilignes,
peu confinés à forte pente



268,08 km (1,57% du réseau)
1103 TGH / 896 segments

Petits systèmes rectilignes,
peu confinés à faible pente

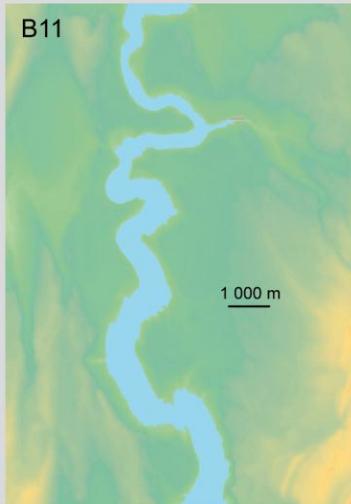


601,33 km (3,53% du réseau)
732 TGH / 546 segments

Figure 3.24. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Petits systèmes.

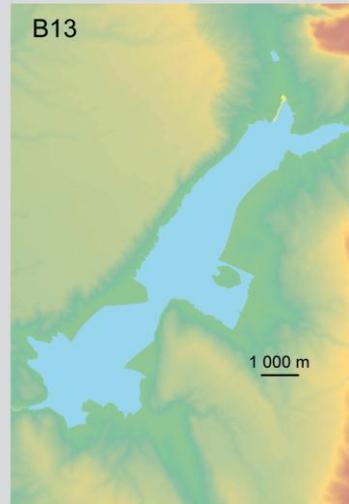
CHENAL SIMPLE

Réservoirs hydro-électriques
ou étendue d'eau
de largeur modérée



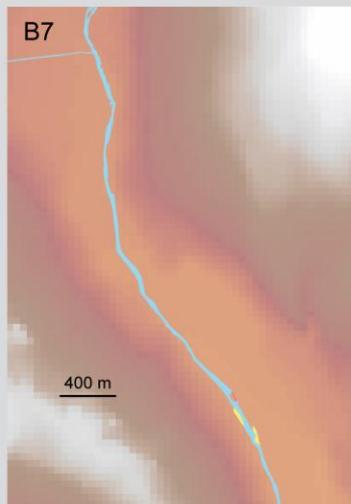
272,18 km (1,60% du réseau)
132 TGH / 106 segments

Réservoirs hydro-électriques
ou étendue d'eau
de grande largeur



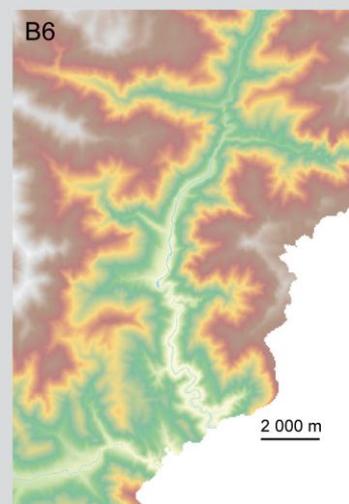
205,35 km (1,21% du réseau)
166 TGH / 113 segments

Chenal rectiligne
à forte pente



532,09 km (3,12% du réseau)
1406 TGH / 1009 segments

Chenal étroit très sinueux
à forte pente



2080,16 km (12,21% du réseau)
1131 TGH / 804 segments

Figure 3.25. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Chenal simple 1.

CHENAL SIMPLE

Chenal de plaine rectiligne et homogène en largeur



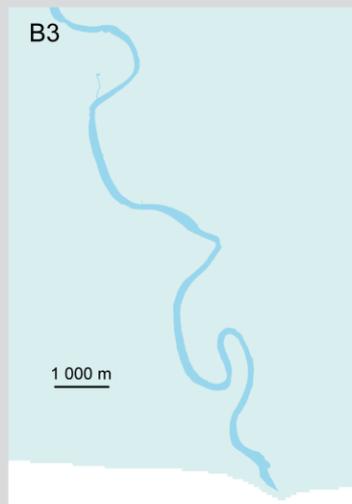
1604,01 km (9,41% du réseau)
1865 TGH / 1032 segments

Chenal de plaine sinueux et homogène en largeur avec présence d'îles



1158,06 km (6,80% du réseau)
871 TGH / 569 segments

Chenal très sinueux et homogène en largeur



2968,45 km (17,42% du réseau)
1357 TGH / 871 segments

Chenal étroit sinueux



461,36 km (2,71% du réseau)
699 TGH / 669 segments

Figure 3.26. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Chenal simple 2.

1.3. Estimation de la pertinence de la typologie des cours d'eau à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse

Pour réaliser une validation experte de qualité, il est nécessaire d'avoir une connaissance de terrain pertinente et homogène sur l'ensemble du bassin. Or nous n'avons à notre disposition aucune typologie de référence des styles fluviaux pouvant être utilisée comme point de comparaison. Par typologie de référence, nous entendons là une typologie uniforme (faite par le même opérateur ou avec les mêmes données) couvrant tout le bassin.

Bien évidemment, il existe de nombreux travaux pouvant servir de base pour évaluer un ou plusieurs secteurs. Par exemple, il est possible de comparer les résultats avec ceux de Bertrand et al. (2012) ou Wiederkehr et al. (2010b) portant sur la Drôme. De fait, la comparaison visuelle entre les types de Wiederkehr et al. (2010b) et ceux obtenus montrent également des résultats relativement semblables. Nous pouvons également voir si les tronçons que nous avons définis comme des tresses (B1 et B10) correspondent à ceux identifiés par Piégay et al. (2009). Dans ce cas particulier, la carte des tronçons en tresses que nous obtenons est assez semblable à celle établie par Piégay et al. (2009), ce qui est encourageant (Figure 3.27).

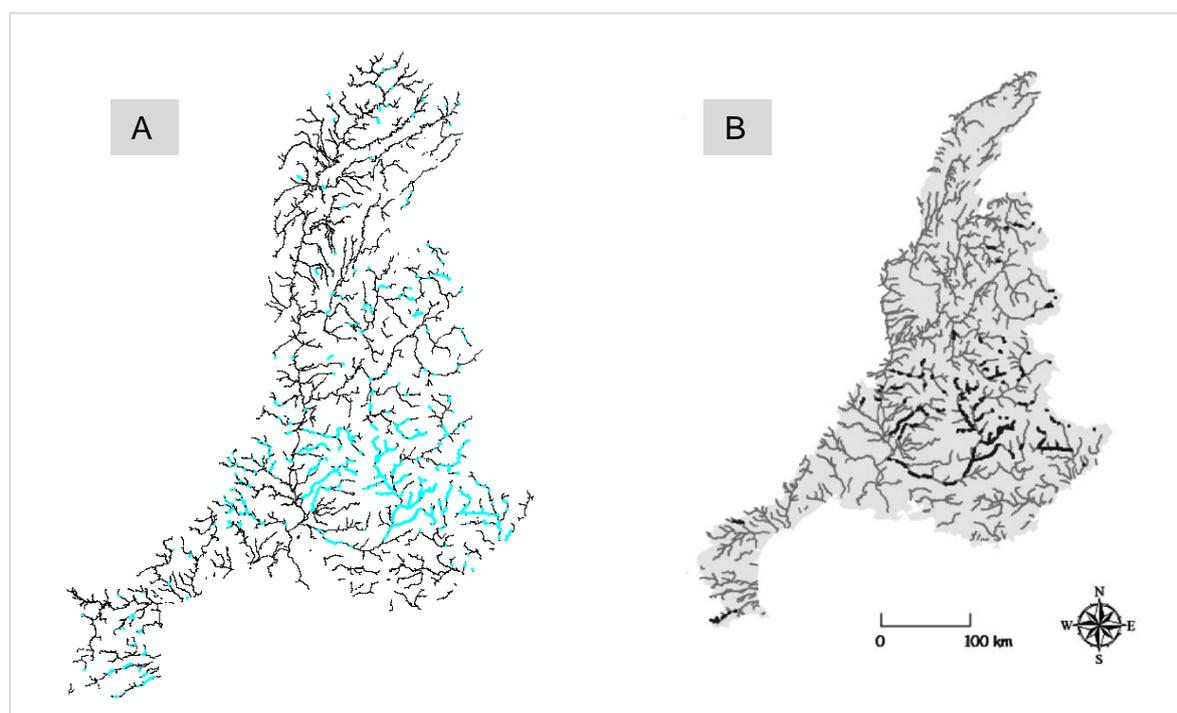


Figure 3.27. Localisation des rivières en tresses par une méthode semi-automatique (A) et par analyse experte (Piégay et al. 2009) (B).

Ces approches restent relativement partielles et à l'heure actuelle seulement qualitatives car elles ne peuvent valider qu'une partie du réseau et non pas l'ensemble des types, entraînant la nécessité d'utiliser une autre approche. C'est pourquoi nous avons décidé de mettre en place, un indice de confiance simple permettant de juger le degré de cohérence de cette typologie. Avec 1% du réseau hydrographique testé (180 TGH), il s'agit d'avoir une première idée de sa valeur avant d'envisager une validation terrain sur certains secteurs.

1.3.1. Méthode

Pour évaluer le degré de cohérence de la typologie, plusieurs indices de confiance ont été définis :

- ✓ Un **indice de confiance global** sur l'ensemble de la typologie permettant d'avoir rapidement un avis sur la qualité de la typologie.
- ✓ Un **indice de confiance par métrique**, permettant de connaître la pertinence de chaque métrique.
- ✓ Un **indice de confiance par type**, pour voir la pertinence de chaque type.

Pour construire ces indices, trois étapes ont été nécessaires.

1. En premier lieu, un jeu de données « test » constitué d'un échantillon de 180 TGH soit 10 par type, répartis sur l'ensemble du bassin a été mis en place (Figure 3.28). Pour faire cette sélection, la fonction « *random* » du logiciel R a été utilisée.
2. Ensuite, pour chaque TGH, nous avons donné une note de 0 à 1⁸ à la modalité prise par chaque métrique en fonction de sa pertinence. Par exemple, pour l'indicateur « pente », si le TGH présente une pente forte alors qu'il est attendu d'après la typologie une pente « faible », la note de 0/1 lui est alors attribuée. Les résultats obtenus ont été comparés à la BD Topo[®] directement.
3. Et en dernier lieu chaque indice de confiance a été calculé et estimé en pourcentage.

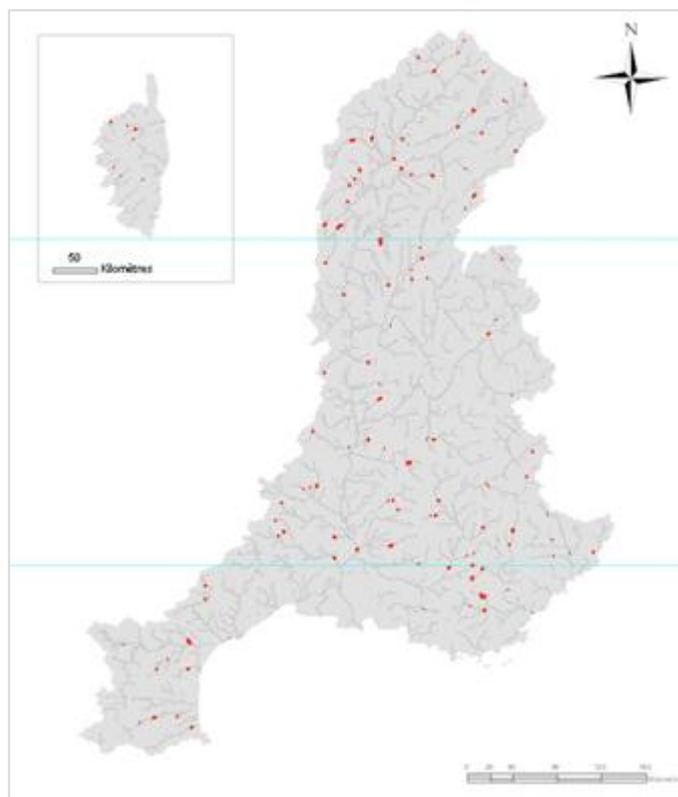


Figure 3.28. Tronçons Géomorphologiques Homogènes (en rouge) testés.

⁸ 0 : aucun métrique est pertinent / 0,25 : trois indicateurs ne sont pas pertinents / 0,5 : deux indicateurs ne correspondent pas / 0,75 : un indicateur ne correspond pas / 1 : tous les indicateurs sont pertinents

1.3.2. Résultats

Les résultats que nous obtenons sont relativement pertinents avec un indice de confiance global de plus de 85% (Tableau 3.8). Les indices de confiance par métrique et par type sont également très satisfaisants, supérieurs à 80%.

Tableau 3.8. Indices de confiance par métriques et par type.

Types	Indice de conf.	Pente	Indice de sinuosité	Largeur de bande active adimensionnelle	Taux surfacique eau / bande active	Taux surfacique bande active / bande fluviale	Écart interquartile de la largeur de bande active adimensionnelle	Indice de confiance par type
A1	100%	90%	75%					88,33%
A2	80%	95%	70%					81,67%
A3	75%	85%	90%					83,33%
A4	75%	95%	95%					88,33%
B1	70%	90%	85%	65%	85%	100%	85%	82,86%
B2	90%	100%	100%	85%	90%	90%	55%	87,14%
B3	70%	95%	90%	95%	100%	95%	75%	88,57%
B4	95%	100%	85%	75%	100%	100%	80%	90,71%
B5	85%	85%	100%	85%	60%	100%	80%	85,00%
B6	90%	70%	80%	100%	85%	95%	85%	86,43%
B7	85%	80%	80%	85%	90%	100%	60%	82,86%
B8	100%	95%	95%	100%	45%	100%	100%	90,71%
B9	90%	75%	85%	75%	85%	100%	70%	82,86%
B10	65%	80%	100%	75%	95%	80%	80%	82,14%
B11	65%	75%	95%	70%	95%	90%	80%	81,43%
B12	100%	65%	70%	100%	90%	100%	95%	88,57%
B13	45%	95%	80%	85%	80%	100%	80%	80,71%
B14	85%	85%	95%	95%	100%	100%	70%	90,00%
Indice de confiance par métrique	81,39%	86,39%	87,22%	85,00%	85,71%	96,43%	78,21%	85,64%

L'observation approfondie des résultats montre que suivant les types, certaines métriques sont plus ou moins mal définies. Par exemple, l'indice de confiance pour le confinement pour le type B13 est relativement moyen (inférieur à 50%). En ce qui concerne le type B8, son indice de confiance pour « taux surfacique eau / bande active » est inférieur à 50%. Quand on observe ces cas de plus près (Figure 3.29), on constate qu'il s'agit de cours d'eau très étroits, qui devraient apparaître comme des « petits systèmes ».

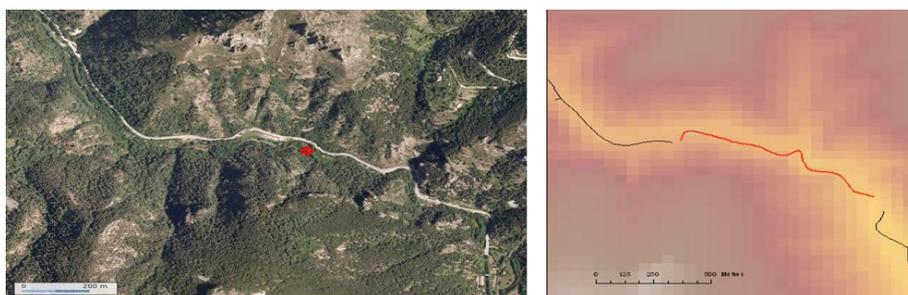


Figure 3.29. Illustration d'un TGH de type B8 : à partir de l'orthophotographie (Géoportail) et représenté de manière vectorielle.

1.4. Bases pour une analyse à l'échelle régionale

La typologie des styles fluviaux a été réalisée sur 13 975 TGH de longueur moyenne de 1,18 km et a donné comme résultats : 18 types de cours d'eau sur le réseau rhodanien. La fusion des TGH adjacents (Tableau 3.9) de même type donne 10 0543 nouveaux segments de 1,62 km de longueur moyenne.

Tableau 3.9 : Présentation des segments (après fusion des TGH adjacents de même type) par types.

Types	Nombre	Longueur total (en km)	Longueur moyenne par segment (en m)
A1	986	1 449	1 469,47
A2	546	601	1 101,34
A3	896	268	299,2
A4	596	1 552	2 603,61
B1	162	373	2 303,79
B2	569	1 158	2 035,26
B3	871	2 968	3 408,09
B4	1 032	1 604	1 554,27
B5	516	321	621,67
B6	804	2 080	2 587,27
B7	1 009	532	527,35
B8	336	603	1 796,06
B9	548	727	1 326,17
B10	403	965	2 393,76
B11	106	272	2 567,72
B12	669	461	689,63
B13	113	205	1 817,23
B14	381	897	2 354,56
Total	10543	17036	1,62

Nous avons à présent des TGH, voire des segments de cours d'eau qui sont renseignés par plusieurs métriques. Il devient alors possible d'envisager une multitude d'études à l'échelle du bassin versant (largeur de la bande active selon la surface du bassin versant en fonction du type, par exemple).

2. Interrogation de la base de données pour identifier les secteurs à haute valeur patrimoniale

Belletti et al. (2012) ont montré que si la largeur de la zone de tressage rapportée à la taille du bassin exposant 0,47 était supérieure à 10, alors il s'agissait de secteurs à forte diversité potentielle en termes d'habitat aquatique.

2.1. Méthode

En partant de cette hypothèse, nous avons produit une **carte des tronçons en tresses potentiellement à haute valeur patrimoniale**, qui pourra ainsi faire l'objet de programmes de préservation. Pour y parvenir, nous avons utilisé la base de données spatiales que nous avons créée. La procédure mise en place s'effectue en quatre étapes. Les trois premières concernent les modules de « géotraitement » du SIG, alors que la dernière est une étape de visualisation.

1. Sélection des tronçons en tresses par requêtes attributaires

Nous avons tout d'abord interrogé la base de données pour ne conserver que les TGH dits en tresses. Il s'agit des tronçons de type B1 et B10. Ces deux types se caractérisent par une bande active composite de largeur de bande active moyenne à large mais hétérogène, voire très hétérogène. 771 TGH ont été sélectionnés représentant un linéaire de 1338 km. La sélection de ces tronçons s'est faite par une **requête attributaire** sur le champ « types ».

2. Calcul de la largeur de bande active adimensionnelle

Pour l'ensemble des tronçons avec bande active, nous disposons de la largeur de la bande active brute et de la surface de bassin versant. Nous calculons donc une largeur de bande active adimensionnelle (Partie 3.Chapitre 2.C.1.1.1).

3. Sélection des tronçons dont la largeur de la bande active adimensionnelle est supérieure à 10

Ensuite nous avons identifié parmi ces zones en tresses les secteurs, dont la **largeur de la bande active adimensionnelle** est supérieure à 10, considérés comme des secteurs potentiels en termes de diversité d'habitats aquatiques et de leur attribuer un identifiant 1 dans un nouveau champ « Potentiel_habitats ». Cette nouvelle variable dichotomique est codée par 0 (pour les tronçons sans potentiel) ou 1.

4. Cartographie des tronçons à fort potentiel d'habitats

Nous établissons une carte à partir de la variable « Potentiel_habitats ». Les tronçons codés 1 sont représentés en rouge sur la carte et correspondent aux tronçons en tresses à fort potentiel de diversité d'habitats. Alors que les tronçons codés 0 sont en orange et représentent les autres secteurs en tresses.

2.2. Résultats

Les résultats montrent que 5,3% des TGH en tresses (61,4 km) sont des secteurs avec une diversité potentielle d'habitats qui est forte (Figure 3.30).

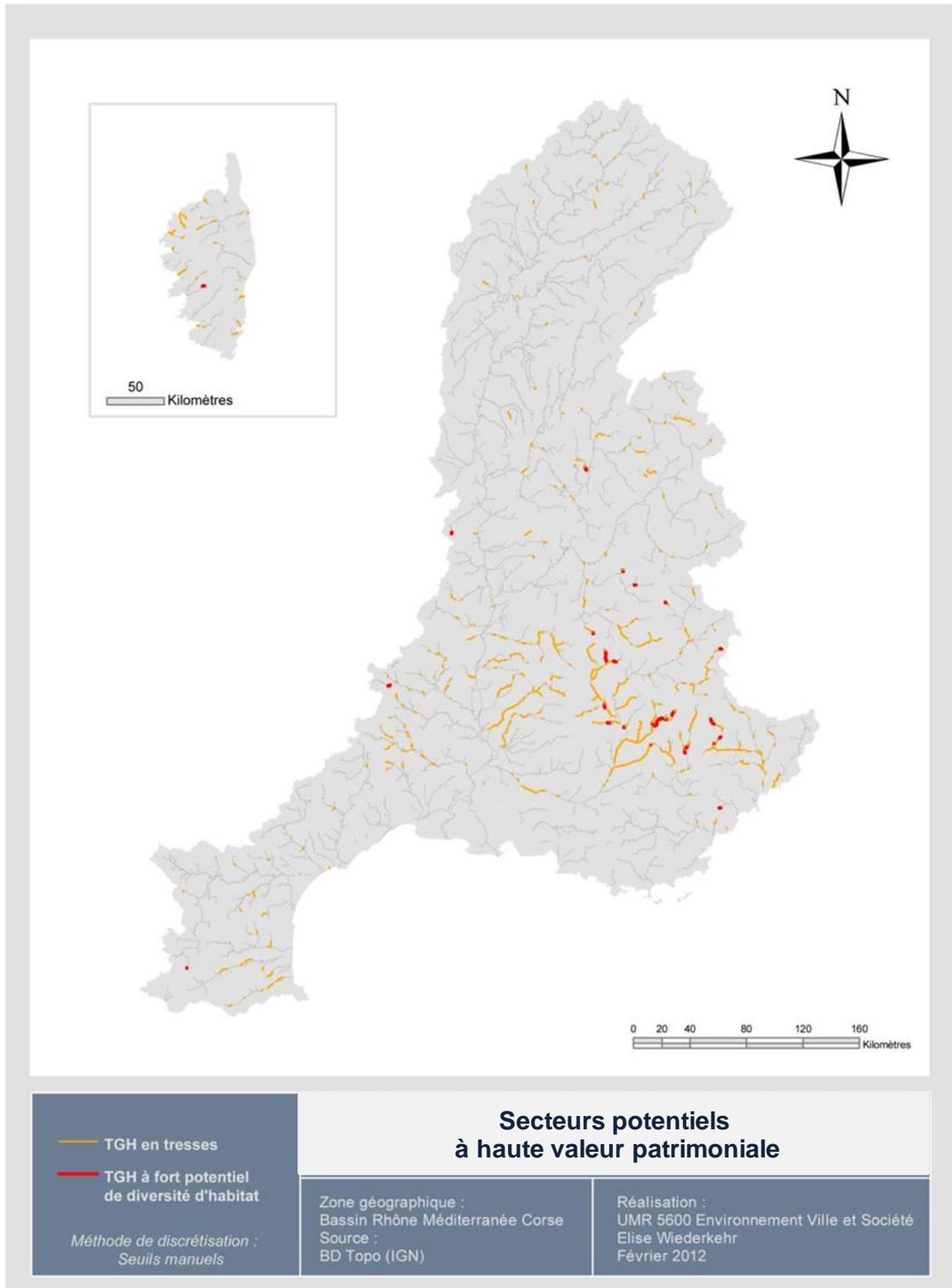


Figure 3.30. Localisation des secteurs en tresses présentant un potentiel de diversité des habitats aquatiques fort.

3. Interrogation de la base de données pour déterminer des secteurs présentant une forte mobilité latérale potentielle

À présent, il s'agit de montrer en quoi l'utilisation du Système d'Information Géographique et l'exploitation des données peuvent servir à appliquer un modèle de prédiction d'érosion latérale à l'échelle du bassin RMC.

3.1. Méthode

Alber (En cours) a établi un modèle d'érosion latérale potentielle à l'échelle du bassin RMC. Celui-ci dépend de deux paramètres, la puissance brute pour un débit biennal et la sur largeur (largeur de la bande active rapportée à la taille du bassin versant $\wedge 0.47$). Aucune valeur d'érosion n'a été calculée pour les bassins Pyrénées et Corse, ainsi que pour le fleuve Rhône car nous ne disposons pas des débits biennaux et des puissances associées.

Le taux de confinement est utilisé afin de ne sélectionner que des fonds de vallée au sein desquels le chenal est potentiellement mobile. Nous n'avons ainsi retenu que les tronçons appartenant aux classes qualifiées de « peu confinées » et « partiellement confinées ». Après avoir éliminé l'ensemble des TGH où la démarche n'est pas applicable, l'érosion potentielle est calculée sur 7 148 TGH, représentant 7 785 km du réseau hydrographique rhodanien (Figure 3.31).

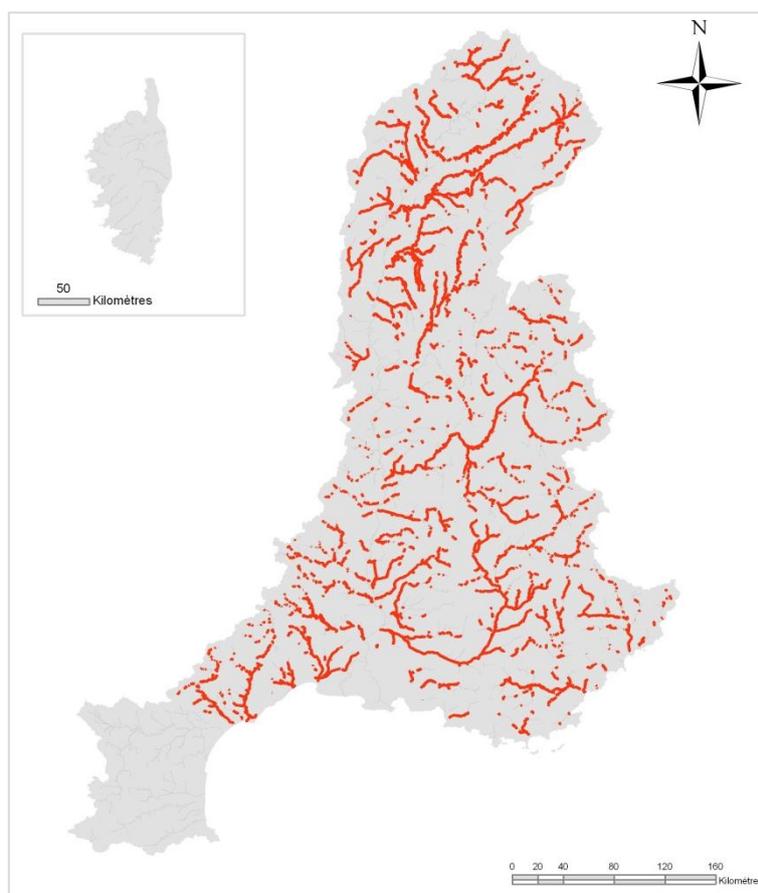


Figure 3.31. Réseau hydrographique où l'érosion latérale potentielle peut être prédite par SIG à l'heure actuelle.

L'application du modèle nécessite le calcul d'un taux d'érosion latérale par TGH, qui s'obtient à partir d'une puissance brute par un débit biennal (Équation 3.3).

Équation 3.3. Détermination du taux d'érosion latérale *EroLat*, de la puissance brute Ω et d'un débit biennal Q_2

$$EroLat = 10^{(-1,8+0,42 \times \log \Omega + 0,47 \times \log W^*)}$$

avec W^* : largeur adimensionnelle

$$\Omega = \rho g Q_2 S$$

Avec ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³), g : l'accélération de la gravité (9.8 m/s²), Q_2 : le débit de fréquence biennale et S : la pente moyenne de la ligne d'eau (en m/m) et Ω : exprimée en W/m

$$Q_2 = a \times Surface \times v^b$$

Les coefficients a et b permettant le calcul du débit biennal ont été déterminés par Alber (En cours) par sous-bassin. Il n'y a pas un modèle commun à l'ensemble du bassin RMC. 15 modèles ont été définis correspondant à des sous zones du bassin du Rhône. Pour mettre en place le modèle, nous devons procéder en trois étapes :

1. déterminer la valeur du débit biennal par sous-bassin, sachant que la surface du bassin versant est définie pour chaque TGH par la base de données RHT,
2. calculer la puissance brute à partir du débit calculé précédemment. Nous disposons des valeurs de pente, également extraite de la base RHT,
3. appliquer le modèle d'érosion latérale, en utilisant la largeur de bande active adimensionnelle calculée pour chaque TGH.

3.2. Résultats

L'application du modèle permet d'obtenir pour chaque TGH une prédiction d'érosion latérale (en m / an). Les résultats obtenus sont projetés sur une carte (Figure 3.32), permettant facilement d'identifier les tronçons potentiellement érodables. Ainsi, il devient facile de cibler les zones d'interventions pour limiter l'érosion et les conséquences qu'elle peut avoir notamment sur les milieux riverains.

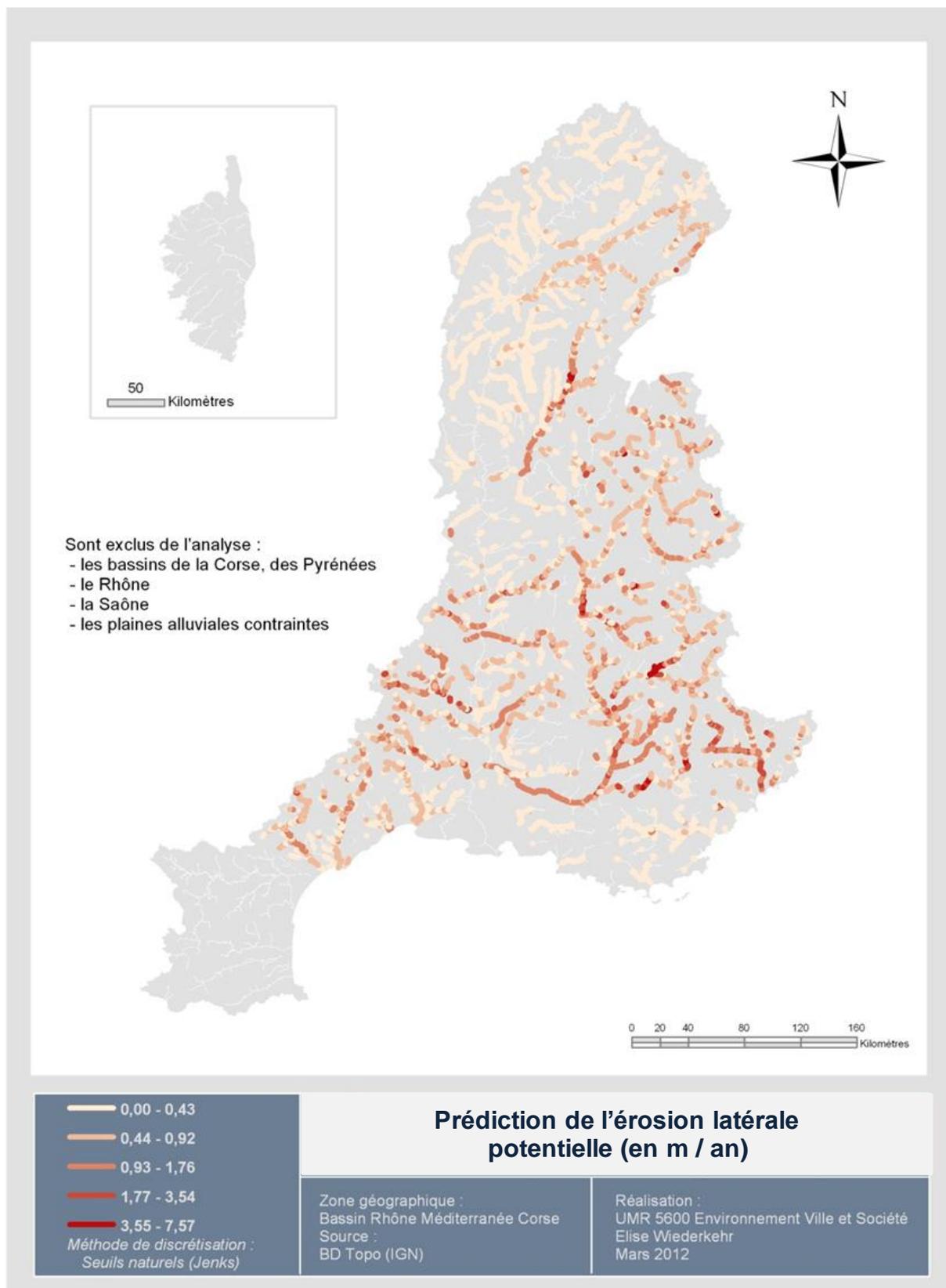


Figure 3.32. Taux potentiel d'érosion latérale par TGH prédit (en m/an) à partir de la puissance brute biennale et de la surlargeur de bande active.

D. Synthèse et discussion

L'objectif principal de ce chapitre était la mise en place d'une méthode permettant l'extraction de mesures physiques à l'échelle du bassin RMC. Ce travail s'est voulu essentiellement axé sur des questions méthodologiques pour montrer les potentialités des données vectorielles. Bien qu'ayant rencontré des difficultés en termes de traitement et de stockage de l'information, nous avons obtenu des résultats laissant envisager de nouvelles questions scientifiques ou des applications à d'autres bassins versants (à l'échelle nationale, par exemple).

1. Typologie à l'échelle régionale

Maintenant que les différents types de cours d'eau sont définis à l'échelle du bassin, une validation terrain s'impose. Celle-ci servira à constater si les types définis correspondent à la réalité du terrain, si la typologie prend en compte les différences locales, la diversité paysagère, si de nouvelles variables sont à intégrer à l'analyse statistique.

De plus, la qualité de cette typologie repose tout d'abord sur une bonne sectorisation du réseau hydrographique. Nous avons pour l'instant utilisé l'algorithme de Pettitt pour identifier des ruptures dans le signal longitudinal des largeurs de la bande active et du fond de vallée. Des travaux sont en cours sur l'utilisation du test de Hubert, notamment Leviandier et al. (2012). Nous pourrions tester différents algorithmes afin de voir lequel donne le découpage le plus pertinent.

2. Base de données : perspectives d'améliorations

Notre approche a mis en évidence plusieurs problèmes. Il ne s'agit pas de limites liées à la méthode elle-même mais plutôt au nombre de métriques disponibles qui est encore limité. Différentes pistes peuvent être envisagées pour améliorer cette démarche.

L'utilisation de données vectorielles plus précises que les données de la BD Topo[®] pour distinguer les objets « eau » et « bancs de sédiments » correctement ne pourrait qu'améliorer la qualité des métriques extraites. Des apports dans ce domaine sont à attendre des travaux conduits par la Maison de la Télédétection (MTD) sur la Saône (Derechef, 2010 ; Lalande, En cours). Une combinaison des données produites ici sur le chenal et des données riveraines de la MTD devrait fournir de nouvelles métriques. De même, les progrès réalisés en analyse d'image devraient donner accès à une information plus précise.

La définition d'un référentiel commun aux différents acteurs de l'eau faciliterait le transfert des données d'une thématique à l'autre (hydrologie, biologie, géomorphologie, ...). En effet, l'extraction des métriques sur l'ensemble du bassin serait d'autant plus pertinente qu'elle intégrerait des bases de données déjà existantes évitant ainsi des « doublons » en termes d'acquisition d'informations. Les données obtenues par l'outil d'audit à l'échelle nationale

développé par le Cemagref (SYRAH) et qui porte sur l'évaluation des « *altérations des processus hydromorphologiques et des formes résultantes pour les cours d'eau* » (Valette et al., 2008) ainsi que la base RHT sont des données complémentaires qui peuvent facilement s'intégrer et étoffer la base de données. D'autant plus que le SYRAH utilise le tronçon hydromorphologique homogène comme « *échelle principale de l'outil* » (Valette et al., 2008). Le Cemagref a extrait ses données par rapport au réseau hydrographique issu de la BD Carthage[®], modifié par Pella et al. (2008). Dans notre étude, nous avons créé un nouvel axe qui correspond à un « mixte » entre la BD Carthage[®] et la BD Topo[®]. Ces problèmes résultent de la mise à disposition progressive de nouvelles données qui impose une adaptation pragmatique. Une réflexion collective s'impose pour arrêter un référentiel hydrographique commun dépendant évidemment des choix qui seront faits quant à la prise en compte du petit chevelu hydrographique.

L'équipe du SYRAH utilise comme unités de base pour extraire des informations, les tronçons fonctionnels sur l'ensemble du territoire national. Les résultats obtenus par une méthode manuelle de sectorisation ne distinguent pas les tronçons en fonction du tracé en plan mais en fonction de la morphologie de la vallée. De fait, un même tronçon géomorphologique peut abriter des sections endiguées ou libres ce qui est différent en terme d'état physique. L'analyse géomorphologique devrait ainsi être considérée non pas à l'échelle du tronçon (au sens de SYRAH) mais à l'échelle d'une section (homogène en terme de tracé en plan) pour déterminer des indicateurs physiques. De fait, le présent travail fournit, pour le bassin du Rhône, ce découpage inédit qui peut par conséquent être introduit dans le calcul des indices fournis par SYRAH.

Pour gagner du temps lors de l'acquisition des métriques, il faudrait davantage optimiser la chaîne de traitement, en évitant le plus possible les étapes de « clic / bouton » faisant intervenir l'opérateur. Pour cela, il serait intéressant d'exploiter davantage les potentialités du module « *Model Builder* » d'ArcGis 10, qui permet de lancer plusieurs « outils » à la fois, simplifiant les opérations complexes.



Partie 4. Étude à l'échelle du faciès

*Caractérisation semi-automatique des méso-habitats aquatiques
par méthode orientée-objet*

Application à la partie aval de la Drôme

A. Introduction

1. L'habitat aquatique : lieu de vie des espèces piscicoles
2. Outil géomatique pour caractériser l'habitat aquatique à large échelle
3. Objectif

B. Détection des méso-habitats de type « mouilles » à partir des valeurs radiométriques

1. Objectif
2. Outils et méthode
3. Détection (semi-) automatique des secteurs en mouilles
4. Quelles leçons en tirer ?

C. Détection et caractérisation des méso-habitats aquatiques par une approche semi-automatique

1. Objectifs
2. Outils et méthode
3. Analyse quantitative du paysage aquatique de la partie aval de la Drôme

D. Synthèse et discussion

1. Classification orientée-objet : outil d'identification des habitats aquatiques à large échelle
2. Utilisation des orthophotographies de la BD Ortho® : véritable apport pour la détection des méso-habitats ?
3. Caractérisation des habitats aquatiques à large échelle

E. Perspectives : étude longitudinale des habitats aquatiques

1. Principe général
2. Outils et méthode
3. Pistes à explorer
4. Conclusion

Précédemment, nous avons illustré par différents exemples, l'étude d'un réseau hydrographique à l'échelle du tronçon fluvial. Il s'agit à présent de montrer comment à l'échelle du faciès, il est possible d'extraire des indicateurs d'état physique à l'aide d'outils géomatiques. L'objectif de cette partie est d'illustrer ainsi le potentiel des images pour l'étude des méso-habitats aquatiques en s'appuyant sur l'exemple de la Drôme.

La présence de mouilles a été caractérisée à partir de valeurs radiométriques extraites des orthophotographies. Ces résultats ont permis d'élargir le champ d'application à l'ensemble des méso-habitats. Nous avons, en effet, mis en place une technique de reconnaissance des habitats aquatiques à partir de l'orthophotographie et dressé une carte des méso-habitats sur une partie du linéaire drômois permettant de réaliser une analyse quantitative du paysage aquatique de manière continue ou par style fluvial.

Enfin, nous avons testé de nouvelles métriques de caractérisation du paysage aquatique à partir d'une extraction longitudinale des valeurs radiométriques.

A. Introduction

1. L'habitat aquatique : lieu de vie des espèces piscicoles

1.1. Définition de l'habitat aquatique

L'**habitat** est le lieu de vie de l'individu, là où il réside (Odum, 1959). Cet environnement se définit par des caractéristiques physique, chimique et biologique (Lévêque, 1995 *in* Cohen (1998)). En tant qu'*espace de vie*, cette zone doit répondre aux exigences écologiques de l'individu qu'il accueille. Il doit prendre en compte des *caractéristiques spatio-temporelles* selon la taille de l'espèce, son espace de mobilité et sa durée de vie (Souchon et al., 2002).

À l'échelle individuelle, l'habitat aquatique combine plusieurs fonctions et cycles de vie (Belliard et al., 2009). On relève quatre fonctions principales qui sont spécifiques selon les espèces et le stade de vie d'une espèce donnée (Baglinière et al., 1982 ; Baran et al., 1993 ; Delacoste et al., 1993, 1995). Il s'agit des *fonctions d'abri, de nourriture, de reproduction, de colonisation d'autres milieux*. Dans les systèmes d'eau douce par exemple, les alevins des salmonidés utilisent en priorité des habitats à grande vitesse alors que les adultes occupent des secteurs à eau profonde (Baglinière et al., 1982 ; Bridcut et Giller, 1993 ; Elliott, 1986). Pour couvrir tous ses besoins physiologiques au cours de sa vie, une espèce donnée exige un nombre complexe d'habitats. **La répartition des espèces s'explique selon la structure spatiale des habitats et leurs liens de connectivité** (Belliard et al., 2009). À l'échelle du tronçon, la qualité de l'habitat peut également expliquer la diversité de la faune et de la flore (Nilsson et al., 1989).

De nombreuses questions appliquées peuvent être abordées via la caractérisation des habitats aquatiques à différentes échelles comme, par exemple, la gestion des ressources halieutiques, l'évaluation des risques environnementaux, en application de la Directive Cadre sur l'eau, ou les actions de restauration.

1.2. L'habitat aquatique vu à différentes échelles

L'identification des habitats passe généralement par l'utilisation de typologies. Le caractère emboîté des habitats fait que ces typologies sont articulées en fonction des dimensions spatiale et temporelle (Bayley et Li, 1992 ; Frissell et al., 1986). Généralement, on différencie trois échelles : le macro-habitat à l'échelle régionale, le méso-habitat à l'échelle du tronçon et le microhabitat à l'échelle du faciès (Malavoi, 1989).

- ✓ L'échelle du **macro-habitat** correspond à la partie du profil longitudinal de la rivière, où les paramètres géologique, hydrologique, morphologique et physico-chimique sont favorables pour les organismes aquatiques (Waddle, 2012).
- ✓ Celle du **méso-habitat** est le niveau intermédiaire.

- ✓ Quant à l'échelle du **microhabitat**, la définition donnée par le guide du PHABSIM (Waddle, 2012) indique qu'il s'agit d'une unité située à l'intérieur du méso-habitat, comme un sous-niveau d'une séquence seuil / mouille (Frissell et al., 1986 ; Souchon, 2002). C'est à cette échelle que l'étude du comportement du poisson ou de l'invertébré aquatique est faite principalement (Frissell et al., 1986 ; Waddle, 2012).

1.2.1. Description des habitats aquatiques

La caractérisation des habitats aquatiques peut se faire soit par **modélisation des microhabitats**, soit par **cartographie des méso-habitats**.

a) Modélisation des microhabitats

Actuellement la méthode la plus usitée est probablement celle des microhabitats. Il s'agit de « *relier un modèle hydraulique avec un modèle biologique pour évaluer l'habitat disponible à l'échelle individuelle* » (Girard, 2008). Ce modèle est basé sur l'extraction de données par coupe transversale. Il est généralement décrit en utilisant un **modèle hydraulique** 1D servant à extraire des variables hydrauliques comme la profondeur d'eau et des gammes de vitesses selon le débit, parfois la taille des grains, ou d'autres variables de l'habitat, comme la couverture, peuvent également être introduites dans le modèle prédictif (Veza, 2010). Le **modèle biologique** correspond aux modèles de préférences d'habitats, et d'espèces ou de stades de vie (Bovee, 1982 ; Gore et Nestler, 1988). Cette méthode a été développée aux États-Unis avec le projet PHABSIM (*Physical Habitat Simulation System* – Système de simulation de l'habitat physique) (Bovee, 1982 ; Milhous, 1979 ; Stalnaker, 1979). Elle a ensuite été adaptée dans plusieurs pays. C'est le cas notamment du RHYHABSIM (*River Hydraulic and Habitat Simulation* – Simulation d'habitat et de l'hydraulique de rivière) (Jowett, 1989, 1996, 1998 ; Mosley et Jowett, 1985) en Nouvelle Zélande. En France, cette méthode a été ajustée par le Cemagref avec EVHA (Évaluation de l'HAbitat physique) (Ginot, 1998 ; Ginot et al., 1998) puis avec les modèles Estimkart (Lamouroux et al., 2010).

b) Cartographie des méso-habitats

L'identification et la cartographie des méso-habitats sont au cœur de nombreuses études écologiques et répondent à différents objectifs (Marcus et al., 2001) comme la gestion de la faune, des ressources piscicoles (Gorman et Karr, 1978 ; Orth et Maughan, 1983 ; Richards et al., 1997), ou l'évaluation des pressions humaines sur les modifications morphologiques du chenal (Gilvear et al., 1995). Plusieurs méthodes ont été développées au cours de ces dernières années : MesoHabsim (Parasiewicz, 2001, 2003, 2007a), Meso-Scale Habitat Classification Method (Borsányi et al., 2004), Rapid Habitat Mapping (Maddock et al., 2001) et MesoCASIMIR (Eisner et al., 2005).

La caractérisation par modélisation des microhabitats a souvent été préférée à la méthode des méso-habitats, notamment pour prédire les *preferendums* piscicoles. Si cette approche nécessite une importante simplification des hypothèses (Girard, 2008), ce choix peut s'expliquer, car seules des

mesures *in situ* sont nécessaires pour l'approche par microhabitat. La cartographie des méso-habitats nécessite de disposer d'informations planimétriques, généralement obtenues par des relevés de terrain, et ensuite de les cartographier. Les méso-habitats correspondent à des zones surfaciques, équivalentes à des polygones (Girard, 2007) et nécessitent un temps de réalisation important. Parasiewicz (2001, 2007b *in* Vezza, 2010) a comparé la collecte de données selon deux méthodes : MesoHabsim et PHABSIM. Les résultats montrent que l'approche par méso-échelle offre plus d'avantages que celle par microhabitat. En effet, le modèle d'habitat par méso-échelle permet un gain de temps sur le terrain et une économie des ressources. Il faut 50 jours pour extraire des données sur un tronçon de 20 km avec le modèle PHABSIM alors que seulement 10 jours sont nécessaires avec la méthode MesoHabsim. La méthode par méso-habitats semble plus simple à mettre en place. Mais il n'est pas possible de modéliser la réponse des habitats aux variations de débit avec simplement une carte : un module de modélisation est dans ce cas nécessaire.

Quelle que soit la méthode utilisée, la question du changement d'échelle reste posée. En effet, comment analyser les habitats aquatiques à large échelle et par conséquent comment passer des taches et de l'information par tronçon au segment et à la caractérisation du réseau ? Pour ce faire, des outils spécifiques doivent être élaborés pour décrire les milieux aquatiques (1) dans leurs composantes physiques (profondeur, vitesse, substrat ...) sinon ils ne sont ni exploitables, ni significatifs et (2) avec une méthode (semi-)automatique sinon cette approche ne peut être ni réalisable ni rentable à large échelle.

1.3. Relation entre habitats aquatiques et unités hydromorphologiques ...

1.3.1. Généralités

Le **méso-habitat** se définit comme une unité spatiale de la rivière avec des caractéristiques physiques communes telles que la pente d'écoulement, la largeur, la profondeur de l'eau, la granulométrie des sédiments (Waddle, 2012), correspondant à l'habitat fonctionnel (Kemp et al., 1999). Le terme de méso-habitat est synonyme *d'unités hydromorphiques* (Bovee et al., 1998 ; Parasiewicz, 2001). Les faciès morphologiques sont considérés par les géomorphologues comme les unités élémentaires de la rivière (Malavoi et Souchon, 2002 ; Newbury et al., 1993 ; O'Neill et Abrahams, 1984). Pour les hydrobiologistes, ces méso-habitats (Kershner et Snider, 1992) assurent différentes fonctions pour les poissons en terme d'habitat (Baglinière et al., 1982 ; Glova et Duncan, 1985). Armitage et Pardo (1995) ajoute que ces unités correspondent à l'échelle des macroinvertébrés, car leur répartition dépend de la taille du substrat. En parcourant la littérature, on constate qu'il n'existe pas une typologie universelle. Suivant les auteurs, les frontières et caractéristiques internes de chaque type d'unité ainsi que leurs dénominations sont différentes (Jowett, 1993). Certains basent leur classification sur la hauteur d'eau et les vitesses (Allen, 1951), alors que d'autres utilisent plutôt la granulométrie (Leopold et al., 1964 ; Mosley, 1982). D'autres variables sont également utilisées comme clés de détermination comme la topographie du lit

(Richards, 1976), le nombre de Froude (Wolman, 1955) ou la pente de la ligne d'eau (Delacoste et al., 1995 ; Yang, 1971). Dans tous les cas, il s'agit d'identifier des faciès d'écoulement compris comme des portions de cours d'eau, qui présentent sur une certaine longueur, une homogénéité des différents descripteurs (Malavoi, 1989). Les tailles de ces faciès peuvent être très différentes et ce, quelle que soit la taille de la rivière. De manière générale, les écologues privilégient les données de substrat ou de végétation pour définir les méso-habitats alors que les géomorphologues se servent des variables de morphologie ou d'hydrologie (Newson et Newson, 2000). Newson et Newson (2000) ajoutent que les chercheurs (Padmore, 1997 ; Wadeson, 1994) définissent *a priori* les unités spatiales avant de les valider en combinant différents paramètres hydrauliques. Afin d'illustrer la diversité des typologies de faciès, deux exemples de classifications sont présentés : Malavoi et Souchon (2002) et Moir et Pasternack (2008).

1.3.2. Exemples de typologies de faciès hydromorphologiques

a) Selon Malavoi et Souchon (2002)

La clé de détermination (Figure 4.1) proposée par Malavoi et Souchon (2002) permet de mettre en évidence onze principaux faciès d'écoulement au sein du chenal. Deux niveaux de classification sont définis. Le premier s'articule autour de deux métriques : la hauteur d'eau moyenne et la vitesse d'écoulement moyenne. Selon le critère pris en compte, on distingue soit les faciès profonds des peu profonds, soit les faciès lenticules des lotiques. Le deuxième niveau de classification permet d'affiner l'arborescence en fonction du profil en travers et du profil en long et des caractéristiques de la surface en eau. La granulométrie du substrat peut également être utilisée pour affiner encore les classes en intégrant un troisième niveau d'information. Selon les besoins d'analyses, ces faciès peuvent être subdivisés longitudinalement (tête, milieu, queue) ou transversalement (rive gauche, milieu, rive droite).

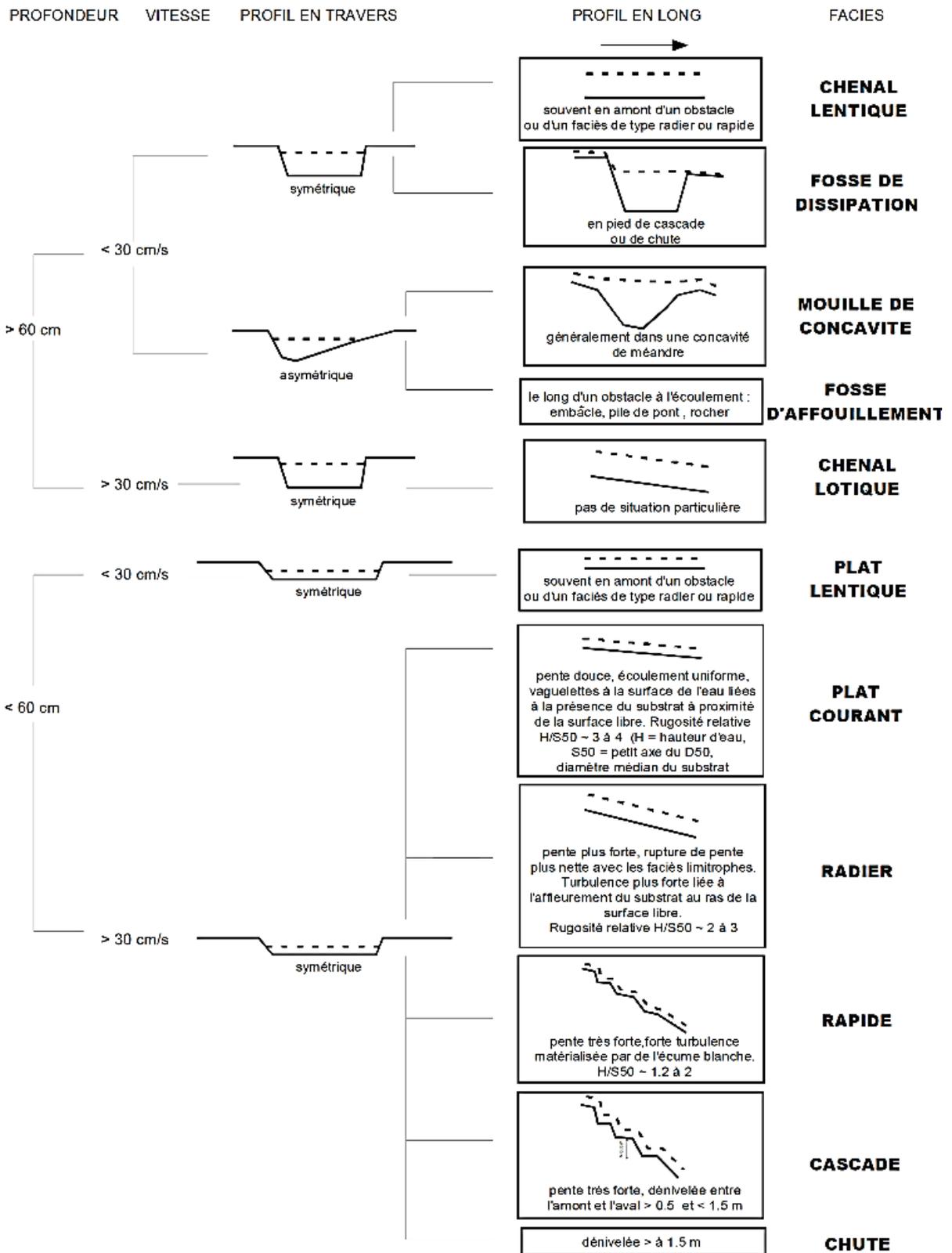


Figure 4.1. Clé de détermination des faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002).

b) Selon Moir et Pasternack (2008)

Les unités morphologiques (Figure 4.2) identifiées sur la rivière Yuba par Moir et Pasternack (2008) sont au nombre de dix : mouille (*pool*), seuil (*riffle*), rapide (*run*), entrée de seuil (*riffle entrance*), mouille contrainte (*forced pool*), chute (*chute*), banc latéral (*lateral bar*), zone de contre-courant (*recirculation zone*), bras mort (*backwater*), chenal secondaire (*secondary channel*). Leur classification s'est essentiellement inspirée des travaux de Montgomery et Buffington (1997), de Padmore et al. (1998) et de Thompson et al. (2001). Les métriques prises en compte pour distinguer ces faciès sont principalement la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la pente de la surface en eau.

Figure 4.2. Illustration des faciès détectés par Moir et Pasternack (2008).

2. Outil géomatique pour caractériser l'habitat aquatique à large échelle

De nombreuses questions scientifiques et appliquées portant sur les habitats intra-chenaux (par exemple : la gestion des ressources piscicoles, l'évaluation du risque environnemental, les actions de restauration) ont besoin d'être abordées à une plus large échelle que les approches traditionnelles par tronçons.

Pour élargir l'échelle d'intérêt, la télédétection peut être une approche intéressante permettant de déduire les habitats à partir de données existantes, comme les photographies aériennes ou satellitaires provenant de capteurs à très haute résolution (Ikonos, GeoEye, WorldView, Pléiade) couvrant des régions entières avec des informations homogènes de très haute résolution (inférieure à 1 m). De plus, plusieurs procédures de traitement des données ont été développées notamment pour la caractérisation de paramètres spatiaux avec des résultats homogènes à large échelle (ensemble du réseau) en combinant différentes méthodes géomatiques. Le développement d'approches texturales et géométriques pour la définition des objets spatiaux (par exemple, la classification orientée-objet) améliore le processus cartographique pour les images à plus faible résolution spectrale comme les orthophotographies. De telles approches ont été utilisées par Wiederkehr et al. (2010a) pour déterminer des tronçons géomorphologiques homogènes en utilisant les paramètres physiques des taches extraites de la bande active ou par Belletti et al. (2012) qui ont caractérisé les habitats aquatiques des secteurs en tresses situés dans le bassin du Rhône.

Enfin, les outils de télédétection permettent de collecter l'information suivant le même procédé à des dates différentes (en fonction de l'image) et, par conséquent, délivrer une base de données temporelle pour étudier l'évolution des habitats et mesurer ainsi la réponse fluviale à différentes actions humaines.

3. Objectif

L'objectif de cette partie est de tester l'intérêt des outils géomatiques pour détecter et caractériser les méso-habitats aquatiques à large échelle. Plusieurs travaux (Brasington et al., 2003 ; Bryant et Gilvear, 1999 ; Carbonneau et al., 2006 ; Chaponniere, 2004 ; Lejot et al., 2007 ; Lorang et al., 2005 ; Marcus et al., 2003 ; Whited et al., 2002 ; Winterbottom et Gilvear, 1997) ont clairement montré l'intérêt des techniques de télédétection pour identifier les méso-habitats et les caractériser à l'échelle du tronçon en termes de taille, géométrie plane ou même bathymétrie. Par exemple, des estimations bathymétriques sont possibles à partir de modèles empiriques basés sur des mesures de hauteurs d'eau. Les outils géomatiques sont réputés très utiles pour réaliser de telles analyses à plus large échelle.

L'objectif est de fournir une approche géomatique pouvant être appliquée à l'échelle du réseau hydrographique par les gestionnaires de rivières à un faible coût et avec des données à très haute résolution spectrale (dans le visible). La caractérisation des habitats aquatiques est basée à la fois

sur l'identification des méso-habitats et de leur cartographie et sur des indicateurs extraits par tronçon géomorphologique homogène.

Pour cela, nous avons réalisé deux analyses : la première est centrée sur un faciès en particulier, la mouille, et la deuxième est basée sur plusieurs faciès. Enfin, nous présentons des pistes méthodologiques pouvant être suivies pour faire une analyse du paysage aquatique par extraction de métriques de structure.

B. Détection des méso-habitats de type « mouilles » à partir des valeurs radiométriques

1. Objectif double

À terme, l'objectif est de créer une méthode pertinente de caractérisation des habitats aquatiques à large échelle. Dans un premier temps, nous nous focalisons sur un type d'habitat : la mouille. Ensuite, nous élargirons notre recherche à l'ensemble des méso-habitats. Pour s'adapter aux contraintes liées à une étude à cette échelle, nous avons opté pour la mise en place d'une méthode automatique, via l'emploi de la télédétection. Notre postulat de départ réside sur le fait que les valeurs spectrales d'une image permettent d'identifier les habitats aquatiques. Pour valider cette hypothèse, nous avons notamment comparé deux types d'unités spatiales (les objets géographiques désagrégés et les polygones intra-chenaux) afin de *déterminer l'unité spatiale donnant les résultats les plus convaincants* (Wiederkehr et al., 2010c). Puis nous avons également testé *la métrique extraite de l'image donnant les meilleurs résultats*.

2. Outils et méthode

2.1. Site d'étude : la partie aval de la Drôme

L'étude a été réalisée sur un linéaire de la Drôme de 25 km de long, de l'aval de Pontaix jusqu'à la confluence avec le Rhône. Le même jeu d'images servant à l'étude préliminaire a été utilisé. Notre étude porte sur douze TGH numérotés de 43 à 54 (Figure 4.3). Ce découpage est issu de la sectorisation du cours d'eau en tronçons géomorphologiques homogènes (Wiederkehr et al., 2010b).

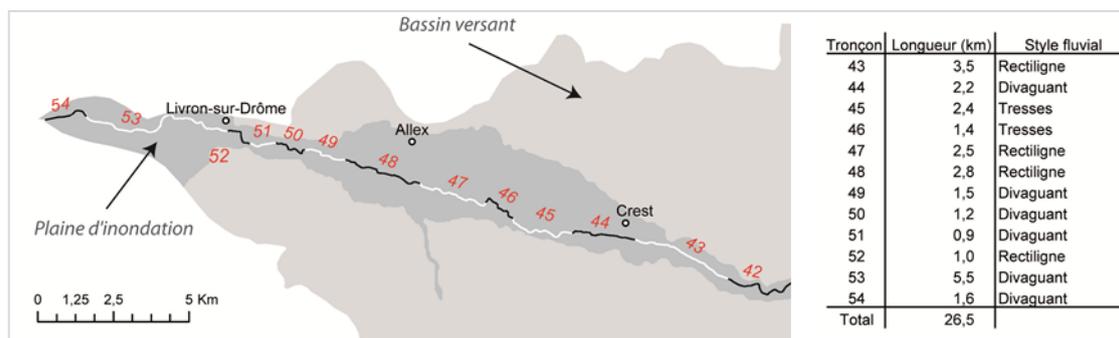


Figure 4.3. Localisation de la zone d'étude et présentation des tronçons géomorphologiques homogènes de la partie aval de la Drôme.

2.2. Modèle de régression logistique : principe général

Notre objectif est de produire un modèle statistique permettant la détection d'un faciès donné (les mouilles) à partir d'une série de métriques radiométriques mesurées en continu le long du réseau (Figure 4.3), extraite des orthophotographies. Pour y parvenir, l'utilisation de la régression logistique a été choisie, car elle s'applique à des variables binaires. Or les modalités prises par la variable « présence de mouilles » sont *oui* ou *non*, respectivement codées 1 et 0. Ce type de modèle *doit permettre d'indiquer, en tout point du réseau, la probabilité de présence ou d'absence d'une mouille*. Cette approche (Figure 4.4) repose sur l'hypothèse que les valeurs de l'ensemble des pixels des unités spatiales permettent de prédire une probabilité de présence de mouilles.

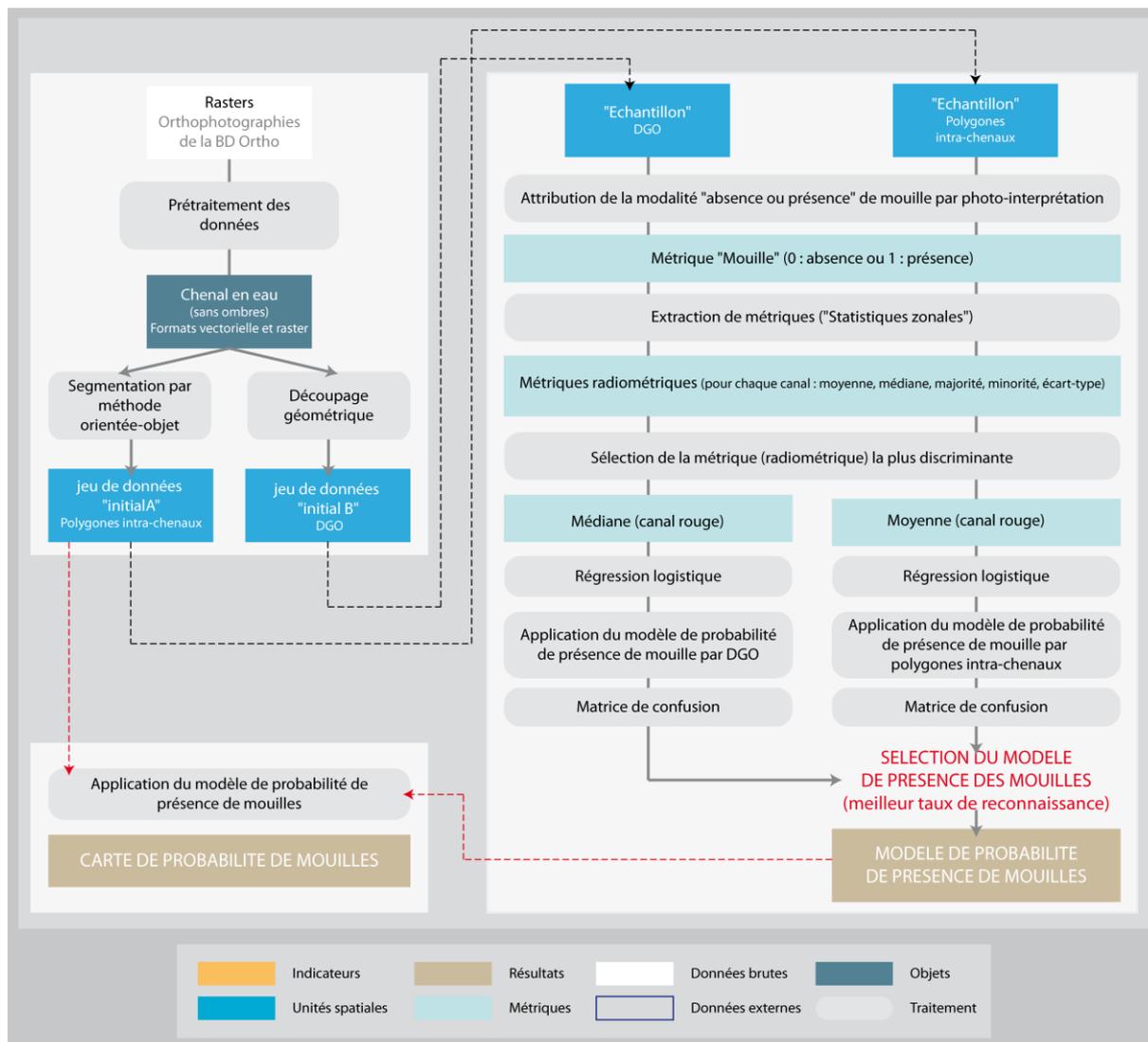


Figure 4.4. Schéma méthodologique : création d'une carte de présence de mouilles (probabilité) à partir d'une régression logistique.

2.3. De l'image aux métriques

Cette analyse a été réalisée en utilisant les images de la BD Ortho[®] de l'IGN (dans le visible du spectre électromagnétique). Les photographies ont été prises entre le 26 mai et le 15 juin 2006 (IGN), durant des conditions essentiellement de basses eaux (Figure 4.5). De ces images a été extrait le chenal en eau sur la zone concernée par approche orientée-objet (Partie 2). À partir de l'objet « eau » nous avons extrait deux types d'unités spatiales : des polygones intra-chenaux et des objets géographiques désagrégés. Ce qui nous donne deux jeux de données « initiaux ».

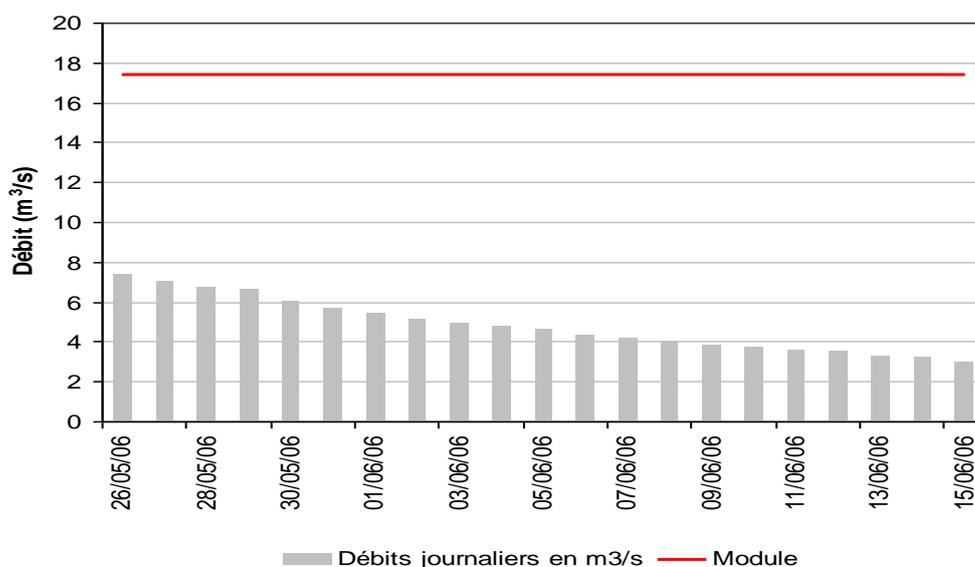


Figure 4.5. Valeur du débit à la station hydrométrique de Saillans (Drôme) (Source : Banque Hydro).

Ensuite, pour chaque jeu de données « initial », nous avons créé un échantillon composé respectivement de 275 polygones et de 2045 DGO. Puis par photo-interprétation, nous avons attribué à chaque unité spatiale, une modalité à la métrique « présence de mouilles » : 0 pour « absence » et 1 pour « présence ». Pour chaque unité spatiale (polygone et DGO), 15 métriques (5 par canal) ont été extraites en utilisant la fonction « statistiques zonales » d'ArcGis. Il s'agit des moyenne, médiane, majorité, minorité et écart-type pour chaque canal (rouge, vert, bleu) (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. Métriques extraites par la fonction « statistiques zonales » d'Arc Map.

Métrique	Description
Majorité	Détermine la valeur qui survient le plus souvent dans la zone.
Moyenne	Calcule la moyenne des valeurs de la zone.
Médiane	Calcule la médiane des valeurs de la zone.
Minorité	Détermine la valeur qui survient le moins souvent dans la zone.
Écart-type	Calcule l'écart-type entre les valeurs de la zone.

Pour chaque type d'unité spatiale (DGO ou polygones intra-chenaux), nous avons identifié visuellement la variable la plus discriminante en analysant leur distribution statistique en fonction

de la modalité prise par la variable à prédire (présence ou absence de mouilles). Pour cela, nous avons utilisé les boîtes à moustaches (*boxplot*). Il en ressort que pour les DGO, il s'agit de la variable « médiane dans le canal rouge » et pour les polygones, de la variable « moyenne dans le canal rouge ». Ce sont ces métriques qui ont été retenues pour la mise en place du modèle.

2.4. La régression logistique comme outil de prédiction d'occurrence des mouilles

Pour identifier la probabilité de présence de mouilles, une modélisation par régression logistique a été mise en place. La régression logistique fait partie au même titre que la régression linéaire multiple ou le modèle de Cox, des modèles multivariés. Elle s'utilise principalement lorsque la variable à expliquer est qualitative et en particulier binaire (présence ou absence de mouille). Dans notre cas, nous avons constitué deux fichiers d'observations, les individus étant soit des DGO, soit des polygones intra-chenaux. Chaque fichier est constitué :

- ✓ d'une variable à prédire, noté Y , qui est dichotomique : présence ou absence de mouille,
- ✓ d'une variable prédictive, noté X , qui est soit la médiane dans le canal rouge pour les DGO, soit la moyenne dans le canal rouge pour les polygones.

L'estimation du modèle de régression logistique (Équation 4.1) correspond à l'équation suivante :

Équation 4.1. Modèle logistique.

$$Y = \frac{e^{a+bX}}{(1 + e^{a+bX})}$$

Avec a , la constante et b , les coefficients de régression logistique.

Le modèle de régression logistique produit une probabilité entre 0 et 1 de la présence de mouilles.

3. Détection (semi-) automatique des secteurs en mouilles

Après application du modèle de régression logistique, nous avons comparé les résultats produits pour chaque échantillon. Il en ressort que les meilleurs résultats sont obtenus pour les polygones intra-chenaux (Figure 4.6). En effet, 88% des polygones intra-chenaux identifiés comme des mouilles sont correctement classés, alors que c'est le cas pour seulement 27% des DGO.

Tableau Résumé de la régression logistique pour Mouille									
Nombre	275								
Manquants	0								
Niveaux de réponse	2								
Paramètres d'ajustement	2								
Log vraisemblance.	-31,009								
Log vraisemblance terme cst	-142,977								
R carré	,783								

Tableau Coefficients du modèle logistique pour Mouille									
	Coef	Erreur std.	Coef/Erreur std	Chi 2	Valeur de p	R	Exp(Coef)	95% inf.	95% sup.
1: constante	18,592	3,489	5,328	28,389	<,0001	,304	118645150,232	127002,154	110838054736,986
MEAN_c1	-,190	,034	-5,576	31,087	<,0001	-,319	,827	,773	,884

Tableau Classement de la régression logistique pour Mouille			
	Prédite : 0	Prédite : 1	Pourcent. correct
Observée : 0	214	2	99,07%
Observée : 1	7	52	88,14%
Total			96,73%

Figure 4.6. Résultats obtenus pour le modèle de régression logistique constitué à partir des polygones intra-chenaux.

Des résultats si différents s'expliquent par le fait qu'un DGO peut être composé de plusieurs faciès différents. Dans ce cas, cela affecte les valeurs radiométriques représentatives de la mouille, alors que généralement le découpage en polygones intra-chenaux permet d'avoir un seul et unique type de faciès par unité spatiale (Figure 4.7).

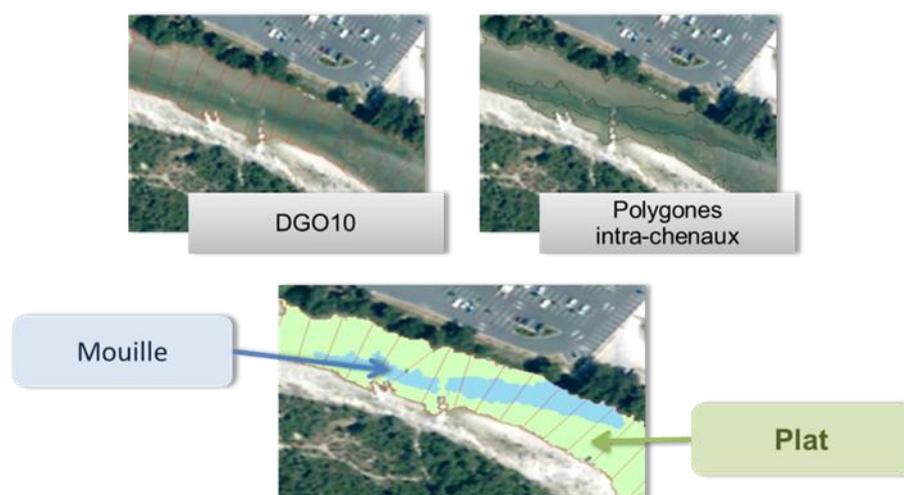


Figure 4.7. Illustration d'un DGO composé de plusieurs faciès morphologiques.

L'application du modèle (Équation 4.2) a été faite sur le jeu de données « initial A ». Ainsi, on obtient une carte du chenal en eau en fonction de la probabilité de présences de mouilles (Figure 4.8).

Équation 4.2. Modèle d'identification des secteurs en mouilles.

$$Y = \frac{e^{19,592 - 0,212 * \text{Moyenne du canal rouge}}}{(1 + e^{19,592 - 0,212 * \text{Moyenne du canal rouge}})}$$

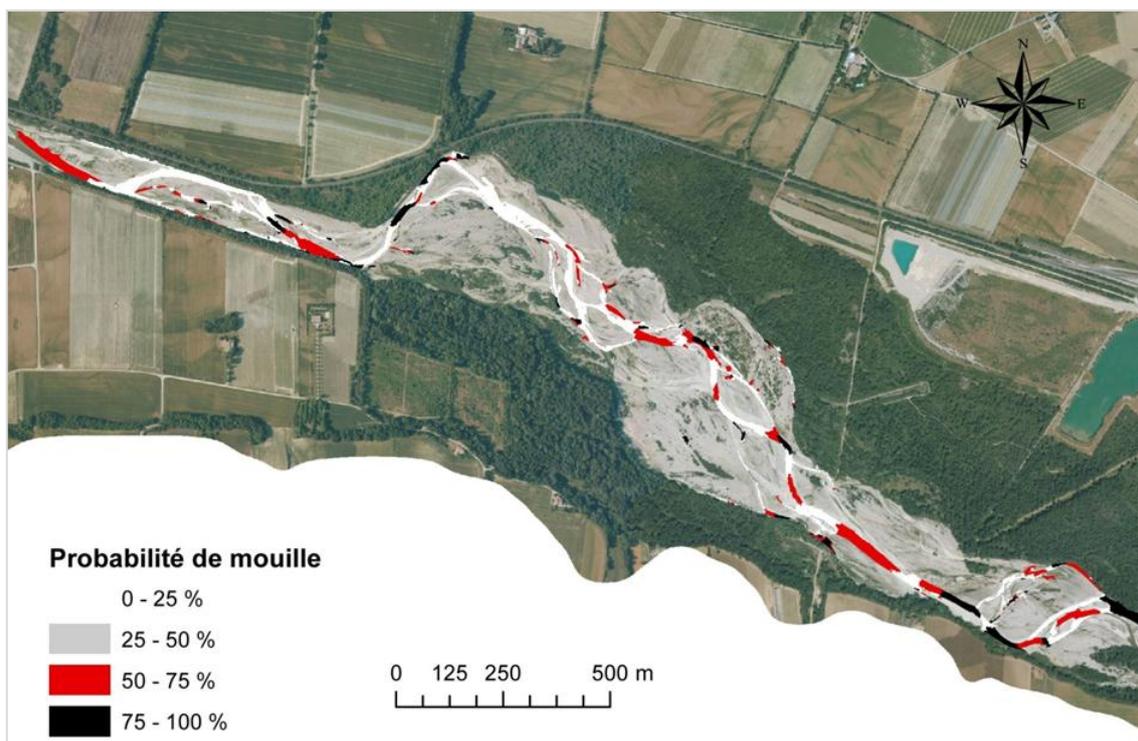


Figure 4.8. Exemple d'un secteur cartographié en fonction de la probabilité de mouille par polygones.

4. Quelles leçons en tirer ?

Ce modèle a été testé uniquement sur la Drôme. Son application à l'ensemble du bassin RMC doit prendre en compte trois principaux problèmes :

- ✓ la qualité des orthophotographies n'est peut-être pas la même sur l'ensemble du bassin RMC.
- ✓ des secteurs à lit étroit peuvent nécessiter une segmentation plus fine. Il serait donc pertinent d'envisager une segmentation en fonction de la largeur de la rivière (Wiederkehr et al., 2009). Car la réduction de la taille des segments peut renforcer l'homogénéité radiométrique de chaque objet. Ainsi, la détermination des zones de mouilles, qui dépend des valeurs radiométriques, pourra être améliorée. Cependant, segmenter de manière plus fine le chenal en eau poserait de nouveaux problèmes, comme un allongement du temps de traitement.
- ✓ des contextes morphologiques différents (par exemple : le Rhône aval est bien trop profond pour détecter à partir de l'image une quelconque structure spatiale).

C. Détection et caractérisation des méso-habitats aquatiques par une approche semi-automatique

1. Objectifs

Nous venons de montrer l'intérêt de l'utilisation des orthophotographies de l'IGN et de la segmentation du chenal par méthode orientée-objet (création de polygones intra-chenaux) pour cartographier la présence de mouilles (le taux de probabilité). À présent, l'objectif est de réaliser une *analyse de la structure des habitats aquatiques à une méso-échelle de la Drôme dans sa partie aval*. Pour y parvenir, nous avons procédé en deux étapes. (1) Nous avons créé *un modèle détectant* non pas un, mais *plusieurs types d'habitats à une méso-échelle*, à partir duquel nous avons réalisé une carte des méso-habitats. (2) Puis nous avons *analysé la structure des habitats* à partir d'une série d'indicateurs pertinents.

2. Outils et méthode

2.1. Identification des méso-habitats par une approche orientée-objet

Pour établir la carte des méso-habitats de la partie aval de la Drôme, nous avons (Figure 4.9) :

- ✓ segmenté le chenal en eau par une approche orientée-objet afin d'obtenir un jeu de données dit « initial » sous forme vectorielle,
- ✓ créé un modèle statistique de reconnaissance des habitats aquatiques à partir d'un jeu de données témoin (noté « échantillon »),
- ✓ élaboré une carte des méso-habitats une fois le modèle validé.

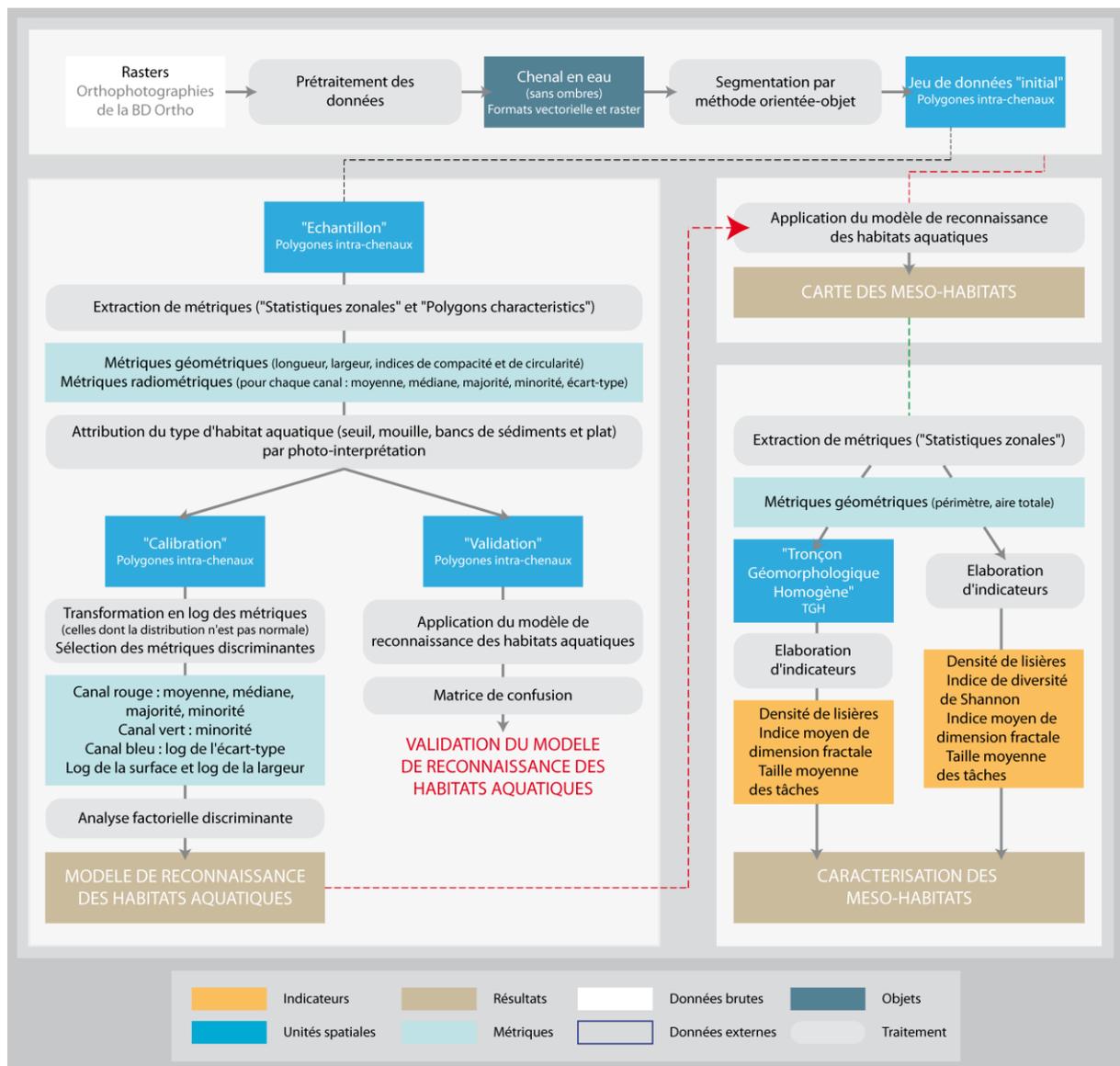


Figure 4.9. Schéma méthodologique : caractérisation des méso-habitats à partir d'un modèle statistique de reconnaissance des habitats aquatiques.

2.1.1. Création d'un jeu de données « initial »

En utilisant la technique de segmentation présentée dans la partie méthode (Partie 2), nous avons créé des polygones intra-chenaux. Ainsi, nous avons constitué un jeu de données « initial », disponible sous forme vectorielle, et comptant 4852 polygones.

2.1.2. Identification des méso-habitats à partir des polygones intra-chenaux

a) Classification manuelle et extraction de métriques pour un échantillon de polygones intra-chenaux

À partir du jeu de données « initial », nous avons fait une sélection visuelle des polygones ayant une nature géomorphologique facilement reconnaissable. Nous avons créé un jeu de données « échantillon » composé de 410 polygones, pour lesquels nous avons renseigné le type d'habitat et extrait une série de métriques radiométriques et géométriques

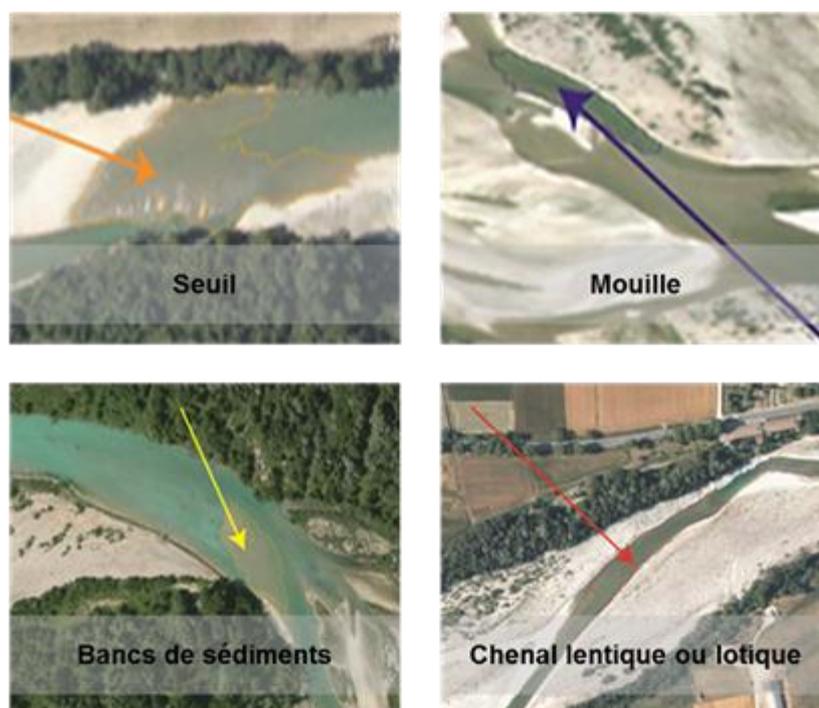


Figure 4.10. Exemples des méso-habitats identifiables sur la Drôme.

Le type d'habitat est basé sur les typologies des méso-habitats de Malavoi (1989) et de Moir et Pasternack (2008) avec quatre principaux types de faciès (Figure 4.10).

- ✓ Les **seuils** sont des zones à forte pente et à granulométrie grossière (Moir et Pasternack, 2008). Ils sont le plus souvent disposés de manière oblique par rapport au sens du courant (Malavoi, 1989) (Figure 4.11).

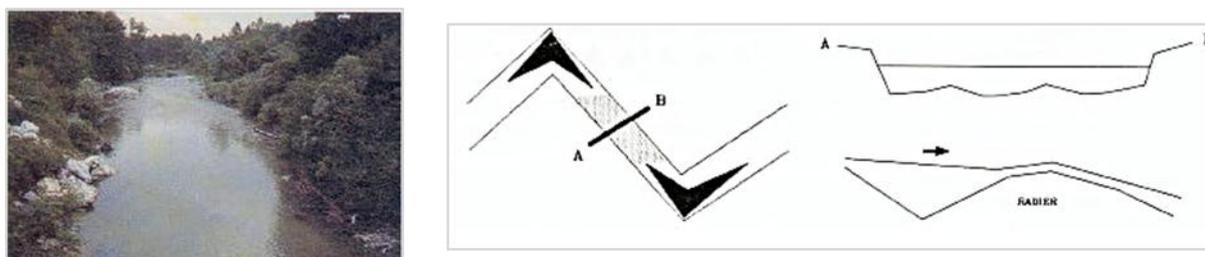


Figure 4.11. Illustration d'un seuil (Malavoi, 1989).

- ✓ Les **plats** (ou chenal lentique ou lotique) sont des zones à lit élargi avec une plus faible pente (Figure 4.12). Le courant et la profondeur sont uniformes. La turbulence y est quasiment nulle. Les matériaux les plus gros sont des galets et des graviers déposés en période de crue. Il s'agit plus d'une zone de transition de matériaux fins que de dépôts ou d'érosion.

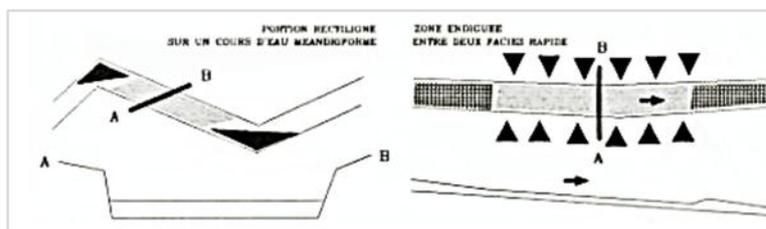


Figure 4.12. Illustration d'un plat (Malavoi, 1989).

- ✓ Les **mouilles** (Figure 4.13) sont des zones profondes à courant faible en période d'étiage avec une faible pente de la surface en eau (Moir et Pasternack, 2008). Elles sont formées lors des épisodes de crues. La granulométrie y est variable. Les mouilles peuvent se repérer dans divers secteurs du cours d'eau : en concavité de méandre, à l'amont d'obstacles ou bien dans les anses d'érosion (Malavoi, 1989).
- ✓ En rive opposée, des mouilles de concavité se forment des **bancs de convexités** (*point bar*) (Figure 4.13) où la hauteur d'eau sur la section est décroissante vers l'intérieur de la courbe. Ces bancs à l'étiage peuvent être émergés.

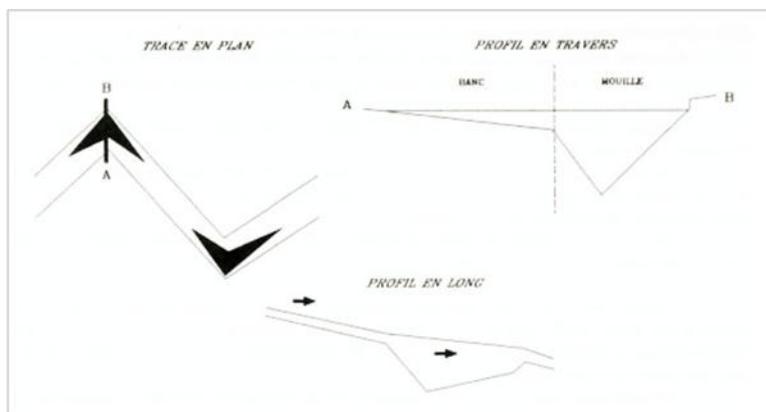


Figure 4.13. Illustration d'une mouille et d'un banc de convexité (Malavoi, 1989).

Il est important de souligner que la mise en place d'une typologie des faciès dépend notamment du débit servant de base à la description (Malavoi, 1989). Ici, nous avons utilisé des images toutes prises en période d'étiage (Figure 4.5). Ainsi, le risque d'erreur dans la détection des habitats est diminué.

Les 410 polygones échantillonnés ont été caractérisés par une variable qualitative à prédire (« type d'habitat »), mais aussi par vingt variables quantitatives prédictives. Quinze d'entre elles sont extraites à l'aide de l'outil d'ArcGis « Statistiques zonales ». Il s'agit des valeurs médiane, moyenne, écart-type, minorité et majorité pour chaque canal composant l'image (rouge, vert, bleu) (Tableau 4.2). Les cinq autres sont des attributs caractérisant la forme des patches. Elles ont été mesurées à partir de la fonction « *Characteristics polygons* » du module supplémentaire d'ET Geowizard (Tableau 4.2) pour quatre d'entre elles (longueur, largeur, ratio de compacité et épaisseur). La surface est évaluée à partir de « Calcul de géométrie ».

Tableau 4.2. Métriques de formes extraites à partir du module ET Geowizard.

Dénomination	Explication
Longueur	Longueur de l'axe le plus long.
Largeur	Longueur du plus petit côté du rectangle d'encadrement aligné avec l'axe le plus long.
Ratio de compacité	rapport aire de la forme / aire d'un cercle de même périmètre ; la valeur se rapproche de 1 pour les formes compactes (cercle = 1)
Épaisseur	Rapport de l'aire de polygones par rapport à la superficie de son carré minimum de délimitation. Le ratio aura une valeur de 1 pour un carré.

b) Élaboration d'un modèle statistique de reconnaissance des méso-habitats

Parmi les métriques extraites, nous avons décidé de retenir uniquement les plus pertinentes, c'est-à-dire celles qui discriminent au mieux les différents types d'habitats. Pour cela, nous avons dans un premier temps observé la distribution de chacune d'elles à partir d'un histogramme. Celles dont la distribution n'était pas normale ont été transformées logarithmiquement. Puis, dans un second temps, nous avons, à partir de *box plot* (Figure 4.14), identifié les variables les plus discriminantes par type de méso-habitat, ainsi nous avons retenu :

- ✓ le log de l'écart-type du canal bleu, la moyenne et la médiane du canal rouge pour les bancs de sédiments,
- ✓ les valeurs moyenne, médiane et majorité dans le canal rouge pour les plats et,
- ✓ la moyenne et la médiane du canal rouge pour les mouilles et les seuils.

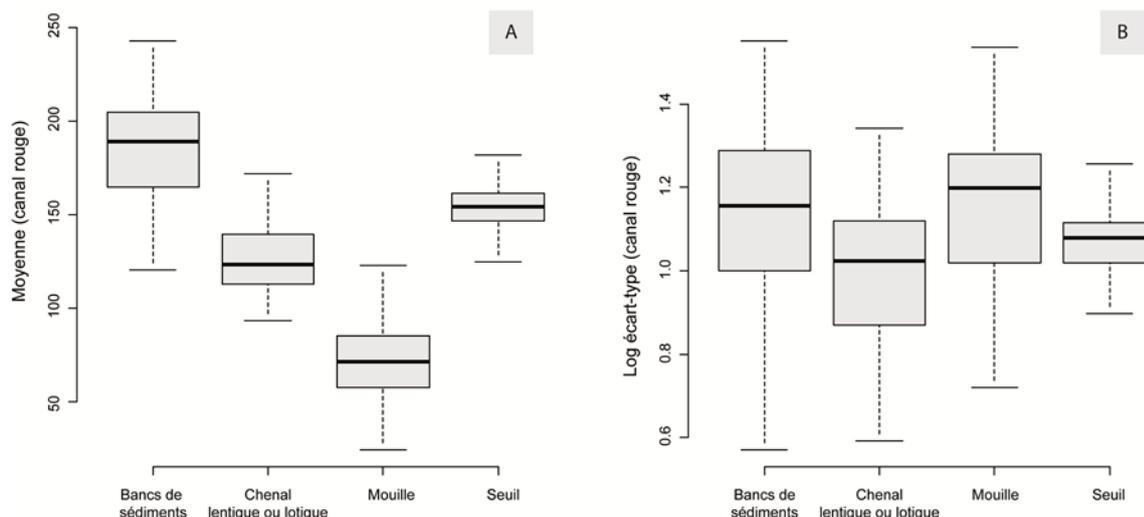


Figure 4.14. Exemple d'une métrique qui discrimine clairement les habitats (moyenne dans le canal rouge) (A) et une métrique sans discrimination entre les différents habitats (log standard deviation dans le canal rouge) (B).

Une fois les métriques retenues, nous avons scindé le jeu de données « échantillon » en deux groupes, l'un servant à calibrer le modèle d'identification des méso-habitats (sous jeu de données « calibration ») et l'autre à tester sa validité (sous jeu de données « validation »). Ces jeux de données sont composés respectivement des $\frac{3}{4}$ et $\frac{1}{4}$ des polygones de l'échantillon. La division s'est faite de manière aléatoire en utilisant la fonction *sample* du logiciel R.

Calibration du modèle

Le modèle statistique utilisé est l'analyse factorielle discriminante (Partie 1.A.2.6). Le package FactoMineR du logiciel R a été utilisé pour exécuter le modèle sur le jeu de données « calibration ».

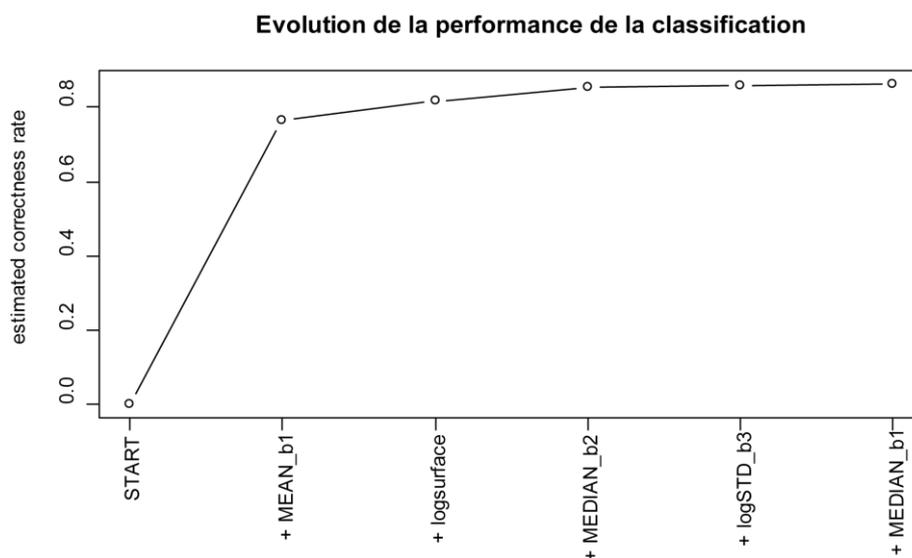


Figure 4.15. Graphique de l'évolution des performances de la classification.

Le graphique d'évolution des performances de la classification (Figure 4.15) montre que cinq métriques (moyenne et médiane canal rouge, log de la surface, médiane canal vert, log de l'écart type canal bleu) sont nécessaires pour obtenir un classement correct de plus de 80% des individus. La moyenne dans le canal rouge explique à elle seule quasiment 75% de ce bon classement ce qui va dans le même sens que le résultat obtenu dans la précédente étude (Partie 4.B), où on montre que la variable offrant le meilleur résultat en termes de détection des mouilles était là aussi la valeur moyenne par polygone dans le canal rouge. Toutefois, l'utilisation des autres métriques n'est pas à exclure. Elle affine le modèle et par conséquent offre de meilleurs résultats. L'analyse détaillée de l'analyse discriminante (Figure 4.16) montre que les mouilles et les bancs de sédiments se différencient bien, alors que les seuils se confondent pour partie avec les plats et les bancs de sédiments.

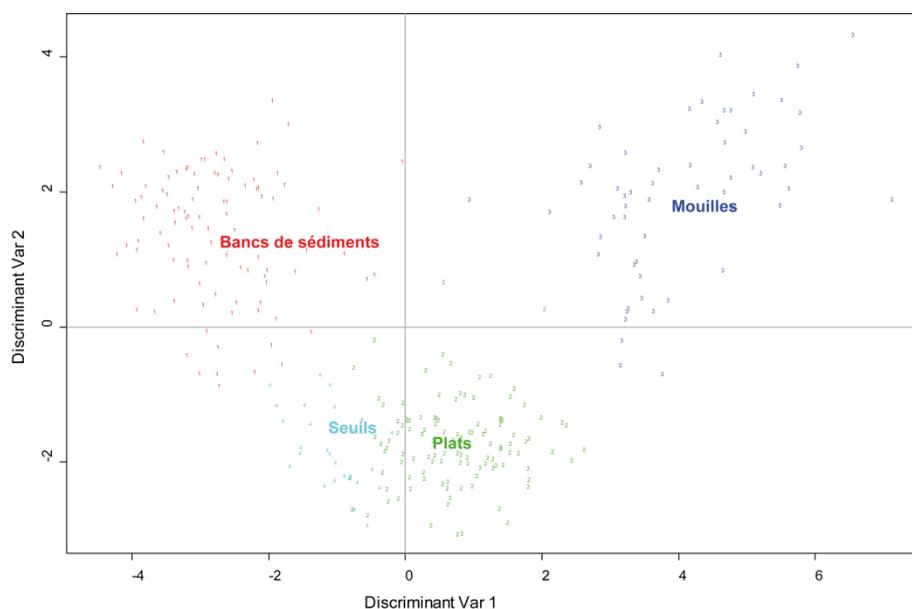


Figure 4.16. Résultat de l'analyse factorielle discriminante.

Validation du modèle statistique

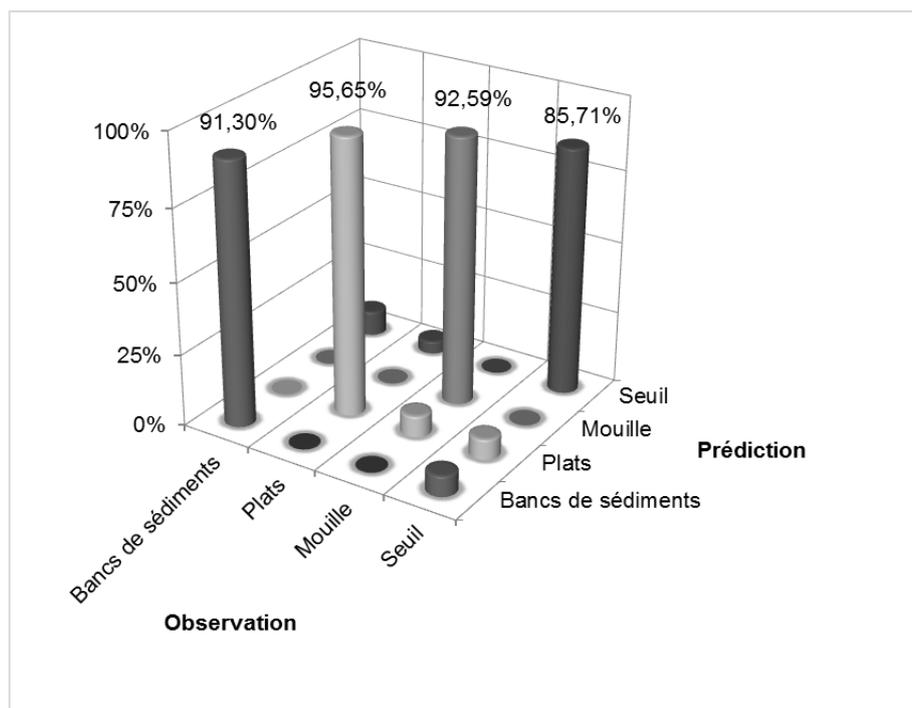


Figure 4.17. Résultats de la matrice de confusion.

Le modèle est validé par comparaison des valeurs prédites par le modèle avec celles observées pour le sous jeu de données « validation ». Les résultats (Figure 4.17) montrent que de manière globale, plus de 92% des polygones sont bien classés. Les « seuils » sont les méso-habitats les moins bien prédits. Ils se confondent principalement avec les « plats » et les « bancs de sédiments ». Les taux de reconnaissance des autres types de méso-habitat (« plats », « bancs de sédiments », « mouille ») sont supérieurs à 90%.

c) Cartographie des habitats à large échelle

Une fois le modèle validé, il est appliqué à l'ensemble des polygones composant le chenal en eau ; une carte des méso-habitats en découle. La fonction *predict* du logiciel R permet de prédire des individus supplémentaires en appliquant les paramètres définissant le modèle statistique. Les polygones adjacents de même nature sont fusionnés. La segmentation initiale réalisée par méthode orientée-objet tend à sur-segmenter le chenal en eau. Or, nous considérons que des taches trop petites n'ont pas d'intérêt dans le cadre d'une interprétation en géomorphologie. Les habitats dont la surface est inférieure à 1 m², soit l'équivalent de quatre pixels, sont supprimés. Cela représente 5% du nombre total de polygones. L'une des alternatives à cette solution radicale serait de définir une règle selon laquelle on fusionne le polygone au plus proche voisin. La carte obtenue est composée de 1548 habitats différents (Figure 4.18).

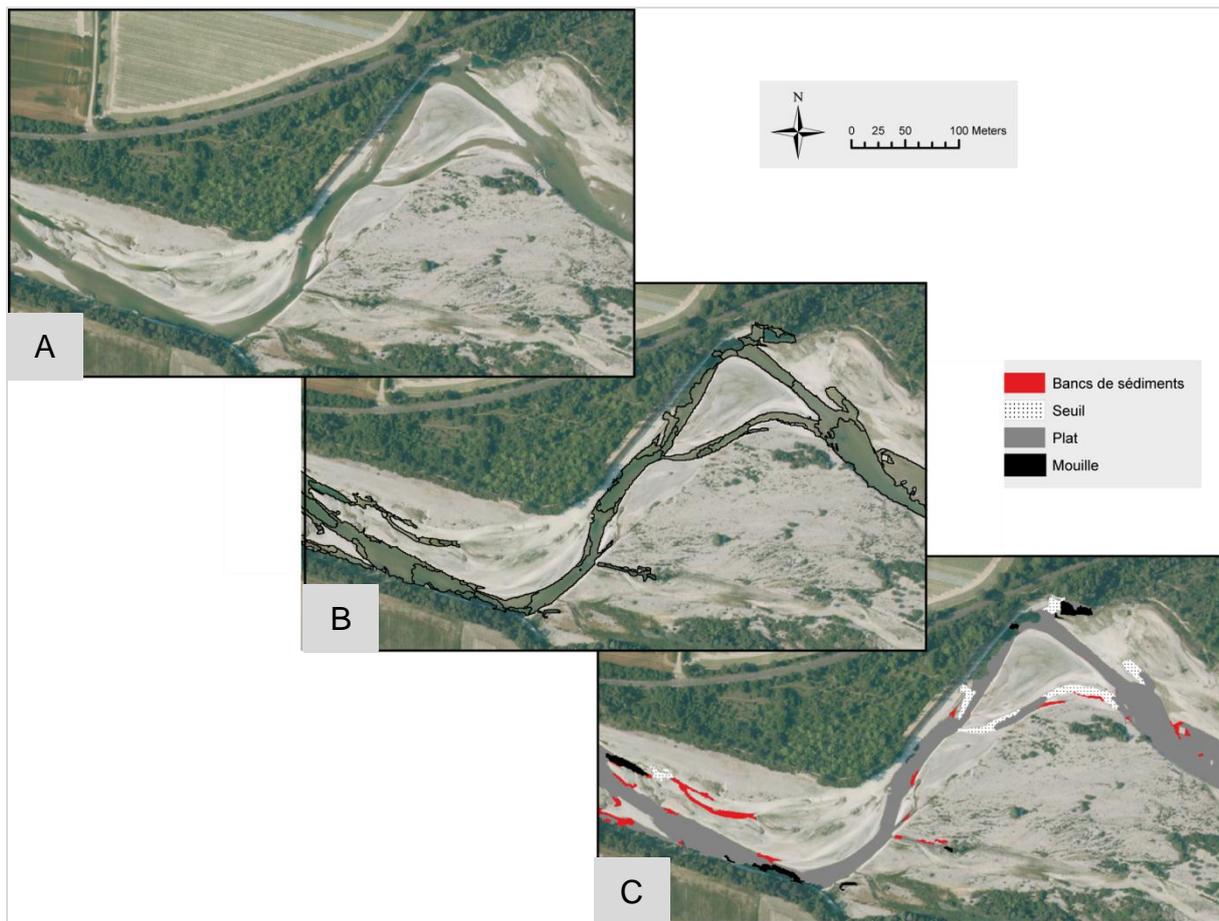


Figure 4.18. Exemple d'un secteur cartographié à partir du modèle de détection de mésohabitats. A : chenal en eau / B : chenal segmenté en polygones intra-chenaux / C : carte des mésohabitats.

2.2. Caractérisation de la structure des habitats aquatiques

Pour survivre, une espèce aquatique doit pouvoir satisfaire ses besoins vitaux (reproduction, nourriture, repos et colonisation) aussi bien dans le temps que dans l'espace. Pour cela, l'individu doit avoir la possibilité de se mouvoir d'un habitat à l'autre sans difficulté. En plus, le déplacement d'une tache d'habitat à une autre peut s'effectuer à des échelles de temps différentes : journalières, saisonnières.

2.2.1. Les indices paysagers : éléments d'analyse quantitative de la structure de la mosaïque des habitats aquatiques

a) Approche basée sur les concepts de l'écologie du paysage

Afin de produire des indicateurs de l'état biophysique du chenal en eau, nous avons opté pour l'utilisation d'outils issus de l'écologie du paysage. Cette thématique de recherche apparue dans les années 1980 (Forman et Gordon, 1986), admet que « *la géométrie des milieux et les effets de voisinage sont des facteurs de contrôle de la présence d'individus d'une espèce et de la dynamique des populations car les déplacements et dispersions d'espèces sont des processus clés liés à la structure du paysage* ». La **mosaïque paysagère** est composée de **taches** (bosquets, prairies, ...) et d'éléments linéaires ; les **corridors**

qui forment ensemble un **réseau** (Burel et Baudry, 1999). Ainsi, par analogie avec le paysage, nous définissons le chenal en eau comme une mosaïque de méso-habitats (les taches) étudiée par des indices de fragmentation, d'hétérogénéité et de connectivité. Trois niveaux d'échelles peuvent être abordés : la tache (l'habitat), la classe (le type d'habitat) et le paysage (la mosaïque d'habitats).

b) Indicateurs paysagers

La **fragmentation** du paysage ne permet pas toujours un bon fonctionnement des populations (Vanpeene-Bruhier, 2003). Elle correspond au découpage de son habitat en plusieurs fragments (Burel et Baudry, 1999). Ce morcellement peut empêcher certains individus de se déplacer et de disposer d'assez de place, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur la pérennité de l'espèce. La diversité du paysage en termes de présence d'habitats renvoie au concept d'**hétérogénéité**. La notion de **connectivité** est assez relative ; elle dépend de l'espèce. On distingue deux types de connectivité : la connectivité spatiale et la connectivité fonctionnelle. La première fait référence à la position dans l'espace (deux taches adjacentes ou jointes). Alors que la connectivité fonctionnelle renvoie à l'idée qu'un individu puisse aller d'une tache à l'autre, même si elles sont éloignées (Burel et Baudry, 1999).

Pour illustrer la capacité de notre approche à fournir des indicateurs de structure des habitats aquatiques, quatre indices ont été retenus parmi la multitude existante : densité de lisières, indice moyen de dimension fractale, taille moyenne des taches et indice de Shannon. Turner et al., (2001) montrent qu'un grand nombre sont redondants.

L'*indice de diversité de Shannon* (Équation 4.3), qui est un indicateur d'hétérogénéité, permet de voir si un faciès domine fortement en proportion (faible valeur) ou bien si l'ensemble des faciès est réparti de façon équitable (forte valeur).

Équation 4.3. Indice de diversité de Shannon.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

p_i = fréquence du faciès i / S = nombre de faciès / H' = indice de Shannon

L'*indice moyen de dimension fractale*⁹ reflète « la complexité et la fragmentation de la forme » (Skupinski et al., 2009). Il varie entre 1 (pour les formes simples) et 2 (pour les formes complexes). L'indice moyen de dimension fractale et la *taille moyenne des patches* sont des indicateurs de fragmentation. La *densité de lisière* (« limite entre deux classes d'occupation du sol par deux milieux ») est un indicateur de connectivité.

⁹). Le terme de fractale a été introduit par le mathématicien français Benoît Mandelbrot en 1975 dans son ouvrage « *Les Objets fractals – Forme, hasard et dimension* » (Duçrot, 2005). Avant l'arrivée de la théorie sur les fractales, les objets présents dans la nature étaient décrits par une géométrie euclidienne (droite, cercle, carré, losange). Une flaque d'eau pouvait être assimilée à un cylindre, ce qui donnait des mesures notamment de surface relativement approximatives. La géométrie fractale permet donc d'effectuer des mesures de formes complexes et irrégulières. La dimension fractale est « un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de fragmentation d'un objet qui mesure la rugosité d'une surface ».

c) Utilisation d'un SIG

L'étude de la structure de la mosaïque paysagère formée par les méso-habitats s'est faite à partir d'un système d'information géographique composé uniquement de couches vectorielles de type surfacique.

- ✓ Une couche représentant le chenal en eau segmenté en tronçons homogènes (TGH). Chaque polygone contient deux informations qualitatives : le **numéro de TGH** et le **style fluvial simplifié** (*tresses / divagant / rectiligne*).
- ✓ Une couche surfacique des méso-habitats construite à partir de la classification réalisée précédemment. Chaque polygone représente une tache de la mosaïque. La table attributaire est composée d'une variable qualitative relative à la nature du polygone (*seuil, mouille, plat ou bancs de sédiments*). Deux informations spatiales ont été calculées pour chaque entité à partir de la fonction « *Calcul de la géométrie* » : la surface (en m²) et le périmètre (en m).
- ✓ Une couche surfacique issue de l'intersection entre les deux précédentes, ce qui permet de disposer pour chaque entité de la surface, du périmètre, du numéro de tronçon, du style fluvial et du type d'habitat.

3. Analyse quantitative du paysage aquatique de la partie aval de la Drôme

3.1. Caractérisation des méso-habitats à l'échelle du linéaire drômois

Le faciès ayant la plus grande superficie est le « *plat* », avec environ 4,9 km² soit 81% du chenal pour seulement 183 taches (Tableau 4.3). Les « *bancs de sédiments* » sont le type de faciès avec la plus importante fragmentation en nombre de taches. Ils regroupent à eux seuls environ 2/3 des patches, pour une surface totale sept fois plus petite que celle des « *plats* ». Les « *mouilles* » et les « *seuils* » représentent à peine 8% (46755 m²) de la surface de la mosaïque.

Les « *plats* » sont les plus grands habitats de la mosaïque. Les « *seuils* », qui sont les seconds en taille, ont une superficie moyenne de 274 m², soit quasiment dix fois plus petite que les « *plats* », dont la taille moyenne est de 2500 m². Les « *bancs de sédiments* » sont les habitats les plus petits (64 m² en moyenne) juste après les « *mouilles* » dont la surface moyenne avoisine les 97 m².

Tableau 4.3. Données caractérisant les taches composant le chenal en eau.

	Bancs de sédiments	Seuil	Plat	Mouille	Total
Aire totale (en m ²)	67 582	30 115	488 796	16 641	603 134
Proportion surfacique (en %)	11	5	81	3	100
Nombre de taches	1 057	110	183	172	1 522
Linéaire d'écotones (en m)	63 786	15 464	117 110	10 809	207 169
Taille moyenne des taches (en m ²)	64	274	2671	97	
Densité d'écotones (en m / m ²)	0,94	0,51	0,24	0,65	
Indice moyen de dimension fractale	1,33	1,29	1,31	1,28	

3.2. Caractérisation des méso-habitats par style fluvial

La densité de lisière par type de méso-habitat (Figure 4.19) est quasiment la même indépendamment du style fluvial, suggérant que le style n'influence pas la complexité de la forme de la tache. En revanche, la diversité paysagère (indice de Shannon) varie nettement en fonction du style avec, pour les secteurs en tresses, un indice supérieur à 1 (Figure 4.20) et une valeur minimale pour les tronçons rectilignes.

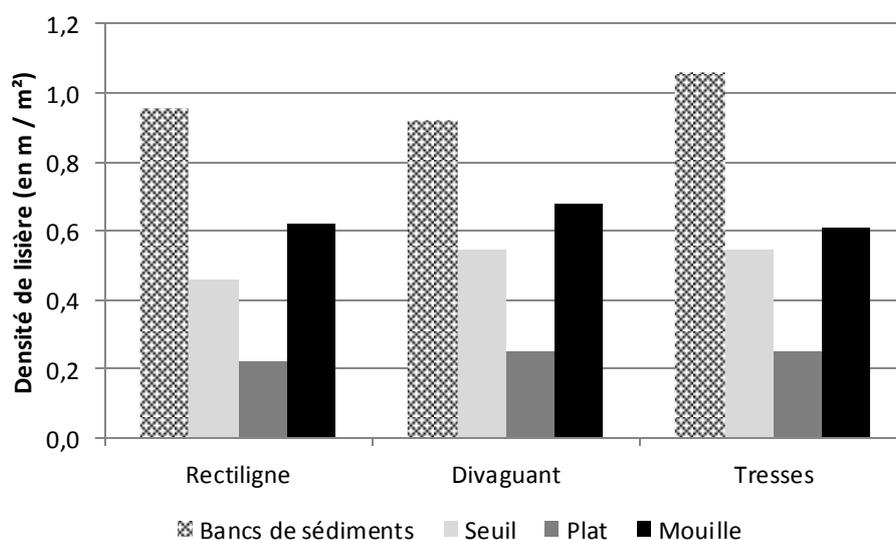


Figure 4.19. Densité de lisière (en m / m²) par styles fluviaux.

L'étude des indices de forme et de taille montre que pour l'ensemble des styles fluviaux (Figure 4.21), la hiérarchie est la même : les « plats » sont les plus grands, suivis des « seuils », des « mouilles » et des « bancs de sédiments ». Une différence importante est cependant observée au niveau des secteurs divagants où les « plats », avec une taille moyenne inférieure à 2000 m², sont bien plus petits que pour les autres styles fluviaux (plus de 3000 m²).

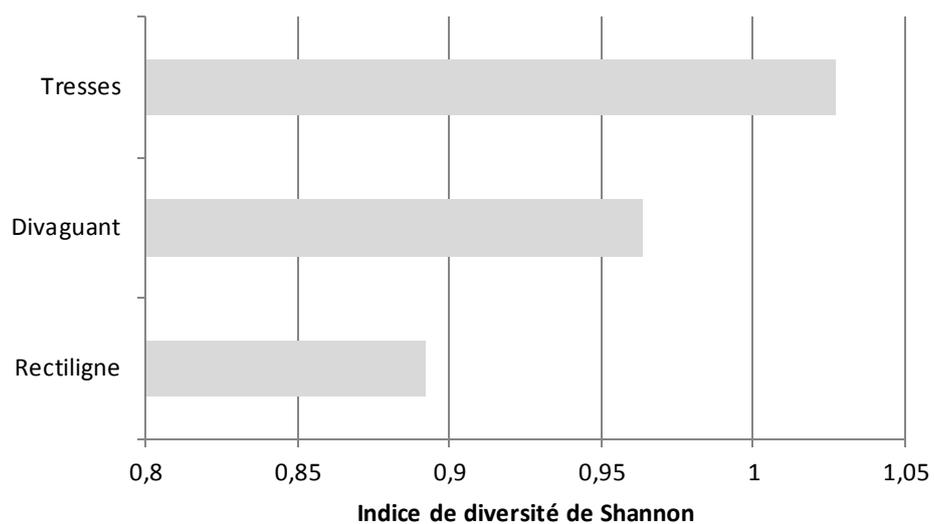


Figure 4.20. Indice de diversité de Shannon par styles fluviaux.

Il ressort de cette étude, que les secteurs en tresses sont caractérisés par une mosaïque de faciès plus hétérogène que celle constituant les tronçons divagant ou rectiligne même s'il n'apparaît pas nettement une complexité particulière des formes au sein des tronçons en tresses.

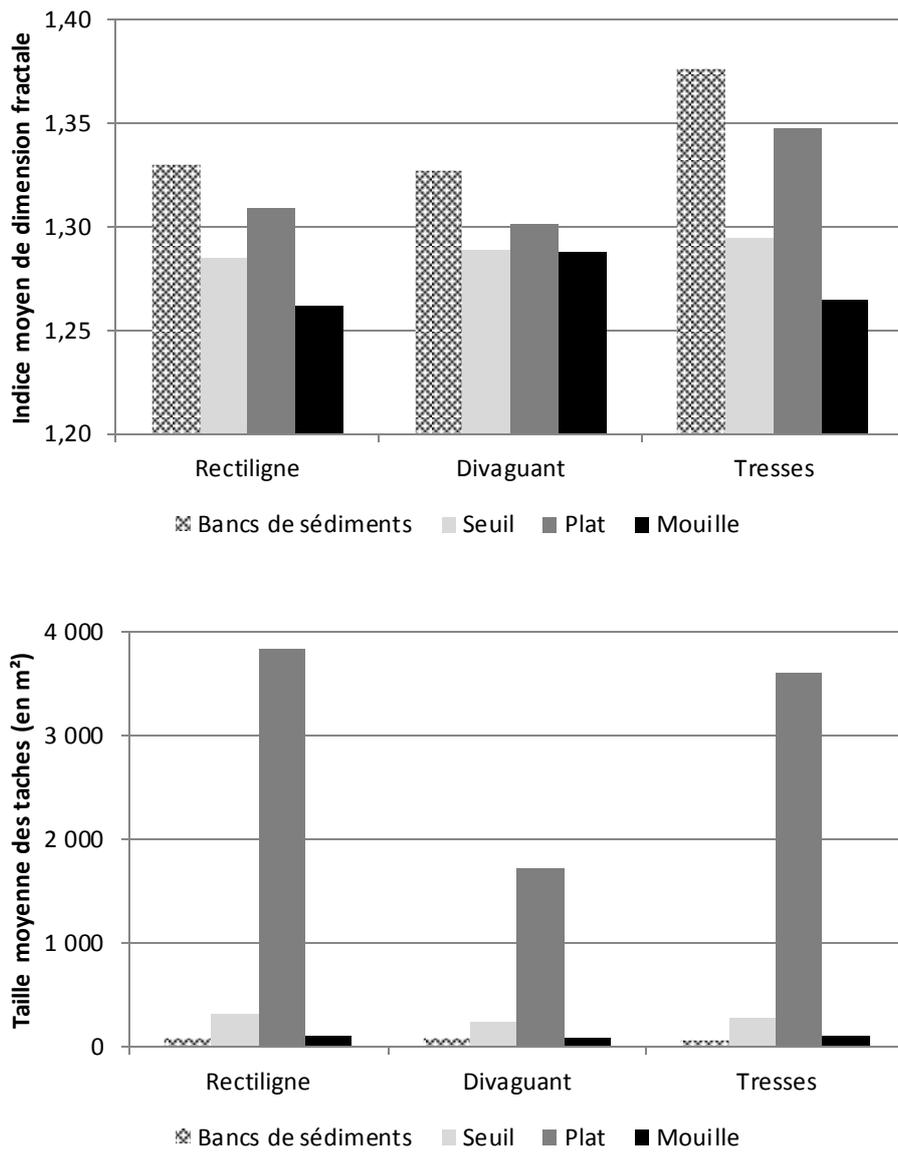


Figure 4.21. Fragmentation : indice moyen de dimension fractale par styles fluviaux et taille moyenne des taches (en m²).

D. Synthèse et discussion

1. Classification orientée-objet : outil d'identification des habitats aquatiques à large échelle

1.1. Les bénéfices de l'approche orientée-objet

Dans cette thèse, nous présentons une méthode d'identification des méso-habitats par approche orientée-objet. Les images utilisées, les orthophotographies de l'IGN, ont une résolution spectrale de faible qualité puisque seulement trois canaux, définis dans le visible, composent ces images. Mais leur résolution spatiale (50 cm) explique probablement en partie les bons résultats obtenus par cette méthode. En effet, plus de 92 % des polygones sont correctement classés. Ces résultats sont qualifiés de bons en comparaison aux techniques similaires. Tormos (2010) a réalisé une carte de l'occupation des sols à l'échelle du bassin de l'Hérault en utilisant des images satellitales (Spot 5) et des orthophotographies. Il obtient d'excellents résultats avec 89% de la surface bien classée par une analyse orientée-objet multi-échelle (à l'aide de règles de classification floues). Pour déterminer l'occupation des sols d'un tronçon de la rivière Ain (France), Perez Correa (2004) a appliqué une méthode orientée-objet sur les orthophotographies de l'IGN qui lui donne une classification précise à 85%.

1.2. Prospective : comment améliorer la procédure d'identification des différents types d'habitats ?

1.2.1. Amélioration des règles de segmentation

L'une des pistes envisageables pour améliorer la classification est d'affiner le paramétrage de l'étape de segmentation. En effet, la qualité de la segmentation impacte favorablement les résultats de la classification (Bo et Han, 2010). Bo et Han (2010) ont travaillé sur la question du paramétrage en utilisant une méthode de croissance de région (« *region growing method* »). Dans notre cas, une série de tests a été réalisée en mode expert, par des tests visuels. Les seuils des critères de segmentation pourraient dépendre de la largeur de l'objet, ici le chenal en eau (Wiederkehr et al., 2009, 2010a) ou être fonction de l'ordre de Strahler du tronçon étudié. Dans cette étude la segmentation donne des polygones de petites tailles. Après la classification, les polygones adjacents de même type ont été fusionnés. Il serait plus judicieux de définir au départ une taille minimale de polygone.

1.2.2. Affinage du nombre de type de méso-habitats

La procédure de classification basée sur un modèle statistique fournit des résultats intéressants même si le modèle a tendance à favoriser les polygones « *chenal lentique ou lotique* ». Un peu plus de

7% des polygones *mouille* et *seuil* sont classés en « *chenal lentique ou lotique* ». Ces résultats ne sont en eux-mêmes pas surprenants : les classes « *lentique / lotique* » peuvent être considérées comme des habitats intermédiaires entre les seuils et les mouilles. Le taux de polygones bien classés pourrait être amélioré en augmentant le nombre de types d'habitats comme l'ont fait Malavoi et Souchon (2002) et Malavoi (1989) en distinguant le chenal lentique du chenal lotique. La classe « *lenticules sableux* » de Schmitt (2001) pourrait être utilisée pour les polygones classés en tant que chenaux « *lentique ou lotique* » semblables à des « *seuils* ».

De plus, la création de l'échantillon de départ est basée sur une interprétation experte de l'image pour créer un échantillon. Cette technique ne donne pas de données sur la vitesse de l'eau. Pour pallier ce manque et améliorer la typologie des faciès, il serait intéressant d'approvisionner un SIG avec des mesures, comme la pente, obtenues par des techniques *in situ* ou par interprétation d'un MNT.

2. Utilisation des orthophotographies de la BD Ortho[®] : véritable apport pour la détection des méso-habitats ?

Les orthophotographies de la BD Ortho[®] ont été sélectionnées pour les aspects techniques suivants (déjà évoqués) : images à haute résolution spatiale couvrant le champ du visible, un coût modéré (Partie 1.A.2). L'utilisation des informations spectrales de ces images a montré plusieurs limites, regroupées en deux grands thèmes :

- ✓ Les problèmes dits « **géographiques** » qui sont liés aux lieux de la prise de vue, aux conditions météorologiques ou hydrologiques (Piégay et al., 2012 ; Wiederkehr et al., 2010c). Les principales erreurs sont liées aux ombres, à l'étroitesse du chenal, à sa visibilité ou à la date de prise de vue.
 - Les *ombres portées* ont des caractéristiques radiométriques très proches des secteurs d'eau profonde. Ce qui explique que nous ayons supprimé avant l'étape de classification les polygones « ombragés », représentant 5% de la surface en eau étudiée.
 - Lorsque le *chenal* est trop *étroit*, la végétation peut recouvrir en partie ou en totalité le chenal. Le chenal étant invisible, il n'est pas possible de détecter les habitats. Le secteur étudié ne pose pas de réel problème car le chenal est relativement étroit et la végétation riveraine peu présente. Plus en amont, on aurait pu rencontrer davantage de difficultés.
 - Selon la *date de prise de vue*, le débit diffère. Les contraintes hydrologiques rencontrées peuvent correspondre à la présence d'une crue, d'une concentration trop importante de matières en suspension ou bien d'un débit trop important ne permettant pas de distinguer une variation de la profondeur de la masse d'eau rendant la visualisation des habitats quasi-impossible. Les images de la BD Ortho[®] sont prises en période estivale, qui correspond pour de nombreux secteurs à la période d'étiage. Dans ce cas, la détection des méso-habitats est envisageable, mais pour les cours d'eau soumis à un régime glaciaire, l'identification sera plus ardue voire impossible.

- ✓ Des problèmes liés à l'image elle-même peuvent exister.
 - La discordance entre deux images peut poser des problèmes d'interprétation du signal radiométrique car il existe une *rupture dans la continuité de ce signal* alors qu'il s'agit du même objet (eau). L'IGN fournit les images de la BD Ortho[®] par dalle. Or ces dalles sont la combinaison de plusieurs images dont les heures et dates de prise de vue ne sont pas forcément les mêmes. Ce problème peut être éventuellement atténué sur le signal en lui-même, en normalisant les données.
 - L'exploitation des images peut être également rendue difficile par les conditions météorologiques ou hydrologiques du jour de la prise de vue. D'un point de vue radiométrique, on peut rencontrer les problèmes suivants : *luminosité trop faible ou trop forte, réflectance de l'eau, reflets sur l'eau.*

3. Caractérisation des habitats aquatiques à large échelle

3.1. Avantages des outils géomatiques

La diversité spécifique dans les cours d'eau s'explique notamment par la distribution des caractéristiques physiques et géologiques (Bovee, 1982 ; Lamouroux, 1997 ; Lamouroux et al., 1999a, 1999b ; Souchon et al., 1989 *in* Labonne (2002)). Le lien entre biologie et conditions d'habitat est souvent abordé par le biais d'approche locale comme les méthodes par microhabitats. Cependant, ces approches présentent des limites notamment en termes de distribution spatiale des données (Labonne, 2002). L'utilisation de la cartographie des habitats devrait permettre d'améliorer leur mise en œuvre en fournissant des données de répartition spatiale des faciès et en permettant d'aborder de nouvelles questions comme celle de la mobilité des faciès par exemple.

Les habitats aquatiques sont caractérisés par des paramètres morphologiques, géométriques et hydrauliques. Généralement, ces métriques sont issues de mesures-terrain réalisables sur des tronçons de quelques mètres, voire de quelques kilomètres. Mais les données sont plus difficilement acquises à l'échelle d'un réseau hydrographique. Pour caractériser les habitats aquatiques, nous proposons une approche géomatique basée en premier sur l'identification des habitats (outil de télédétection) et ensuite, sur l'extraction de métriques (outil de SIG).

3.2. Intérêt de l'approche paysagère pour automatiser la caractérisation des habitats aquatiques

Au-delà de la production de métriques, l'approche développée ici permet d'alimenter l'analyse des milieux aquatiques avec des indicateurs de structuration des habitats en utilisant des outils développés notamment par l'écologie du paysage. Cette approche a également été mise en œuvre avec succès par exemple par Le Pichon (2006), Le Pichon et al. (2006) afin d'évaluer l'impact des aménagements sur le barbeau fluviatile ou par Belletti et al. (2012) afin de caractériser les habitats en tresses du bassin rhodanien.

Ce travail constitue une première étape qui mériterait d'être suivie d'une analyse fine des liens entre métriques paysagères et composition des biocénoses (Le Pichon et al. 2006) afin soit de vérifier que les indicateurs définis ici peuvent être reliés à des éléments concrets de caractérisation du milieu physique et biologique, soit de développer des indicateurs plus pertinents. Par exemple, il serait intéressant d'étudier la relation entre l'indice de Shannon des méso-habitats et la diversité piscicole ou entre la densité de mouilles et la présence de telle ou telle espèce. Si de tels liens étaient établis, il serait possible d'utiliser ces indicateurs d'une part à très large échelle en tenant compte des limitations identifiées (Partie 2.B.2.4) et d'autre part à des dates différentes dans le cadre d'études diachroniques des changements saisonniers en termes de mosaïque d'habitats.

E. Perspectives : étude longitudinale des habitats aquatiques

Nous venons de montrer l'intérêt de l'approche orientée-objet pour l'identification des méso-habitats. Cependant, d'autres approches, complémentaires, sont également potentiellement adaptées pour appréhender la question de la caractérisation des habitats aquatiques, par exemple l'analyse du signal et des indices texturaux.

Dans cette partie, la *capacité des données radiométriques extraites des orthophotographies par segment élémentaire (par objets géographiques désagrégés) à renseigner sur la structure des habitats aquatiques est testée par une analyse du signal ou de la texture de l'image.*

1. Principe général

Dans le cas des chenaux en eau, le signal peut être défini comme la variabilité longitudinale des valeurs radiométriques prises par chacun des segments élémentaires (DGO). L'étude de la variation longitudinale de la radiométrie à partir d'un ensemble de segments élémentaires peut permettre de distinguer différents cas :

1. un chenal homogène, lisse, ne présentant aucune variation longitudinale de faciès,
2. un chenal présentant au contraire une organisation longitudinale avec un signal plutôt périodique rendant compte par exemple de l'alternance seuil – mouille,
3. un chenal homogène longitudinalement mais présentant localement une texture complexe rendant compte d'une forte turbulence de l'écoulement ou d'un lit torrentiel à granulométrie très grossière. Dans ce cas c'est la variabilité intra-segment et non plus la variabilité inter-segments qui est étudiée.

Ces différentes structures peuvent être mises en évidence à partir de trois indicateurs : les **variabilités du signal inter-segments et intra-segment et l'étude d'un indice textural.**

2. Outils et méthode

Nous présentons ici différentes pistes d'études. Les images de la BD Ortho[®] de l'IGN ont servi à extraire le chenal en eau sous forme *raster* et vectorielle (Partie 2). Les unités spatiales définies au préalable sont des objets géographiques désagrégés (DGO). Pour chaque DGO, une métrique radiométrique (moyenne dans le canal rouge par exemple) et un indice textural sont extraits (Figure 4.22). La suite de l'étude repose sur l'analyse d'indicateurs élaborés à partir de ces métriques et évalués à l'échelle d'objets géographiques agrégés comme les tronçons géomorphologique homogènes.

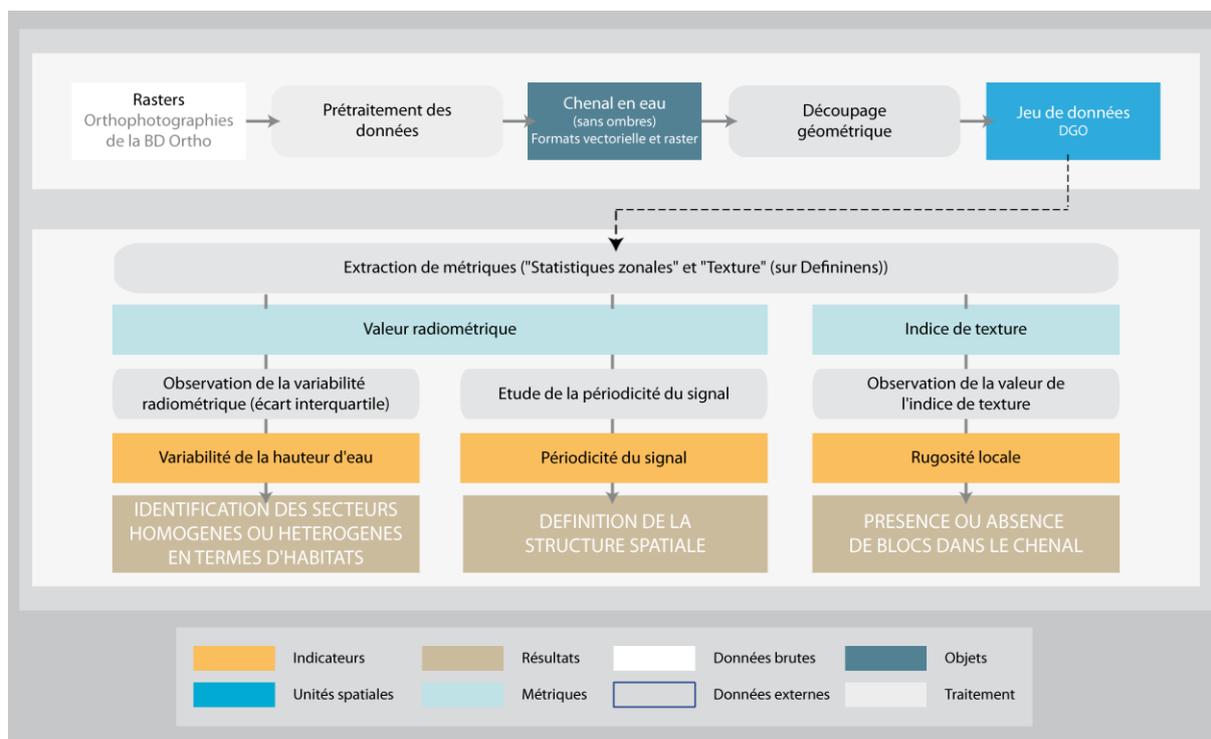


Figure 4.22. Schéma conceptuel de l'étude des habitats aquatiques à partir d'indice de texture et de l'analyse du signal.

3. Pistes à explorer

3.1. Variabilité de la hauteur d'eau par analyse du signal intra-segment

La variabilité des valeurs radiométriques entre deux tronçons géomorphologiques homogènes (ou d'autres unités spatiales réagrégées) met en évidence la structure longitudinale du lit et par conséquent les différents faciès composant le chenal en eau. Un signal avec peu de variabilité est synonyme d'une structure avec des fonds homogènes alors qu'un signal de grande amplitude reflète une structure avec différents faciès.

La variabilité du signal peut s'évaluer par l'écart interquartile de la série des valeurs radiométriques moyennes calculées pour chaque segment. Il s'agit d'un indice de dispersion mesuré entre le premier et le troisième quartile de la distribution radiométrique de l'ensemble des pixels du chenal en eau. Un faible intervalle interquartile indique donc une faible variabilité radiométrique et indique une forte homogénéité d'habitats.

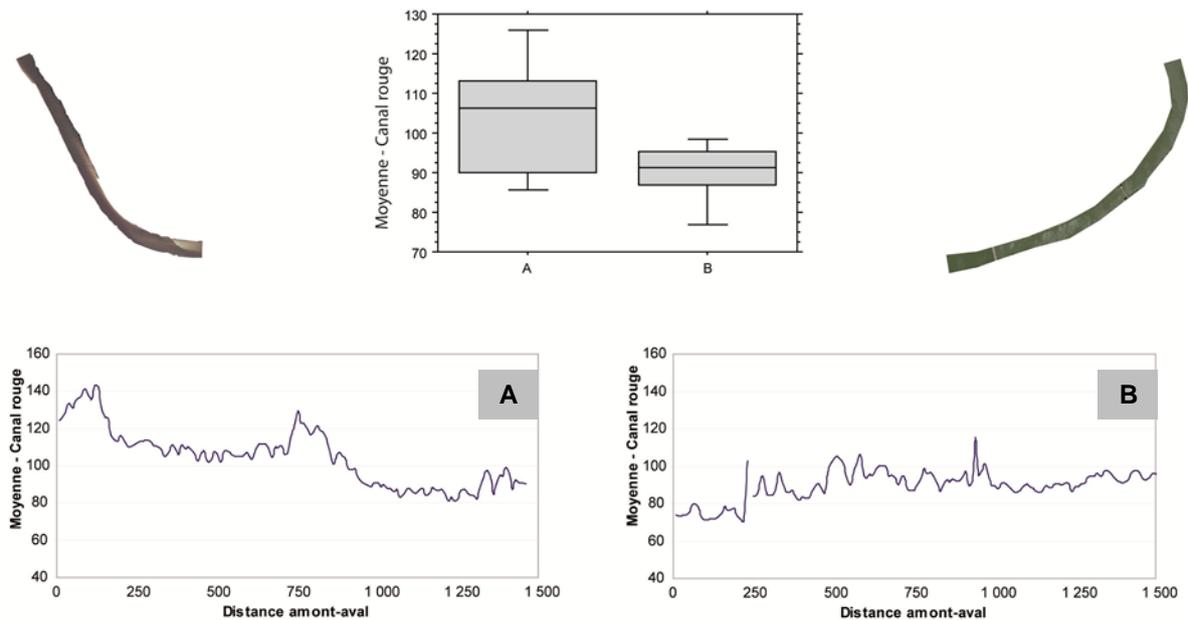


Figure 4.23. Comparaison de la distribution des valeurs radiométriques entre un signal à forte variabilité (A) et un à faible variabilité (B).

A partir de cette mesure de variabilité on peut donc distinguer deux cas (Figure 4.23) :

1. un signal avec peu de variabilité s'apparentant à une homogénéité des formes fluviales,
2. ou un signal avec une forte variabilité inter-segment, dans ce cas on se trouve probablement en présence de plusieurs faciès, contrastés en terme de profondeur.

3.2. Rugosité locale par analyse d'un indice de texture

Carbonneau et al. (2004) utilise la texture de l'image pour évaluer la taille des grains. La texture correspond à la fréquence de variation et à la disposition des nuances de gris ou de teintes d'une image. Elle est souvent présentée de manière qualitative : fine, moyenne, rugueuse, rayée ou tachetée. Nous faisons l'hypothèse qu'un indice textural peut être un excellent indicateur de la présence ou non de blocs dans le chenal. En effet, les DGO (Objets Géographiques Désagrégés) composés de blocs doivent se caractériser par une forte hétérogénéité des valeurs de pixels au sein de l'unité spatiale alors que les zones sans blocs devraient avoir une valeur homogène.

Dans le cadre d'une étude future, il peut être intéressant d'extraire l'indice d'homogénéité d'Haralick (1979) qui indique la potentialité de trouver le même couple de pixels. Plus cet indice est élevé, plus l'image est uniforme ou d'une texture périodique (Figure 4.24) et donc l'habitat, localement homogène (par exemple uniformément profond ou turbide). À l'inverse une faible valeur de cet indice, c'est-à-dire une texture rugueuse, indique un chenal localement hétérogène par exemple une zone à blocs située en amont du réseau hydrographique.

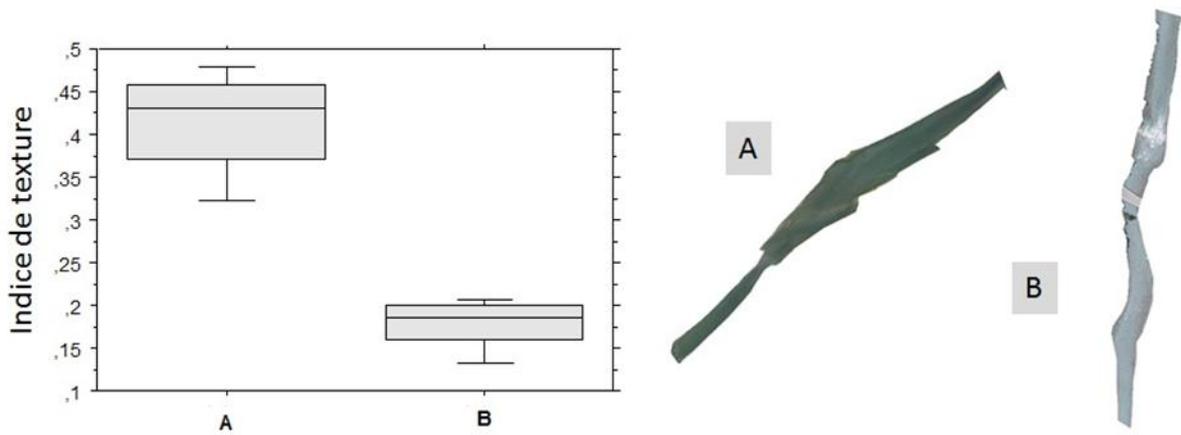


Figure 4.24. Exemple d'un indice de texture présentant un secteur rugueux (B) et un secteur non rugueux (A).

3.3. Séquence seuil / mouille

Lorsque le signal étudié montre une forte variabilité, il convient de déterminer si celui-ci présente une allure périodique ou non (Figure 4.25). Un signal est dit périodique lorsqu'il se répète à l'identique à un intervalle de temps donné, noté T . La périodicité du signal peut être étudiée à partir de l'autocorrélation spatiale.

4. Conclusion

Le découpage longitudinal du cours d'eau et les outils géomatiques (analyse d'image et SIG) permettent d'envisager encore de nombreux développements méthodologiques pour la caractérisation des systèmes fluviaux. Par exemple, l'analyse d'un signal radiométrique ou de la texture de l'image semble proposer des perspectives de travail intéressantes.

Ainsi, il est possible de combiner différentes approches statistiques selon l'objectif et la nature des objets à décrire (Figure 4.26). Ces approches peuvent s'appuyer sur des méthodes telles que l'autocorrélation spatiale (comme outil d'identification d'une séquence seuil / mouille) ou la transformée en ondelettes. Ainsi il serait possible de voir si oui ou non il existe une structure spatiale qui se répète à l'échelle globale du cours d'eau ou à une échelle plus fine.

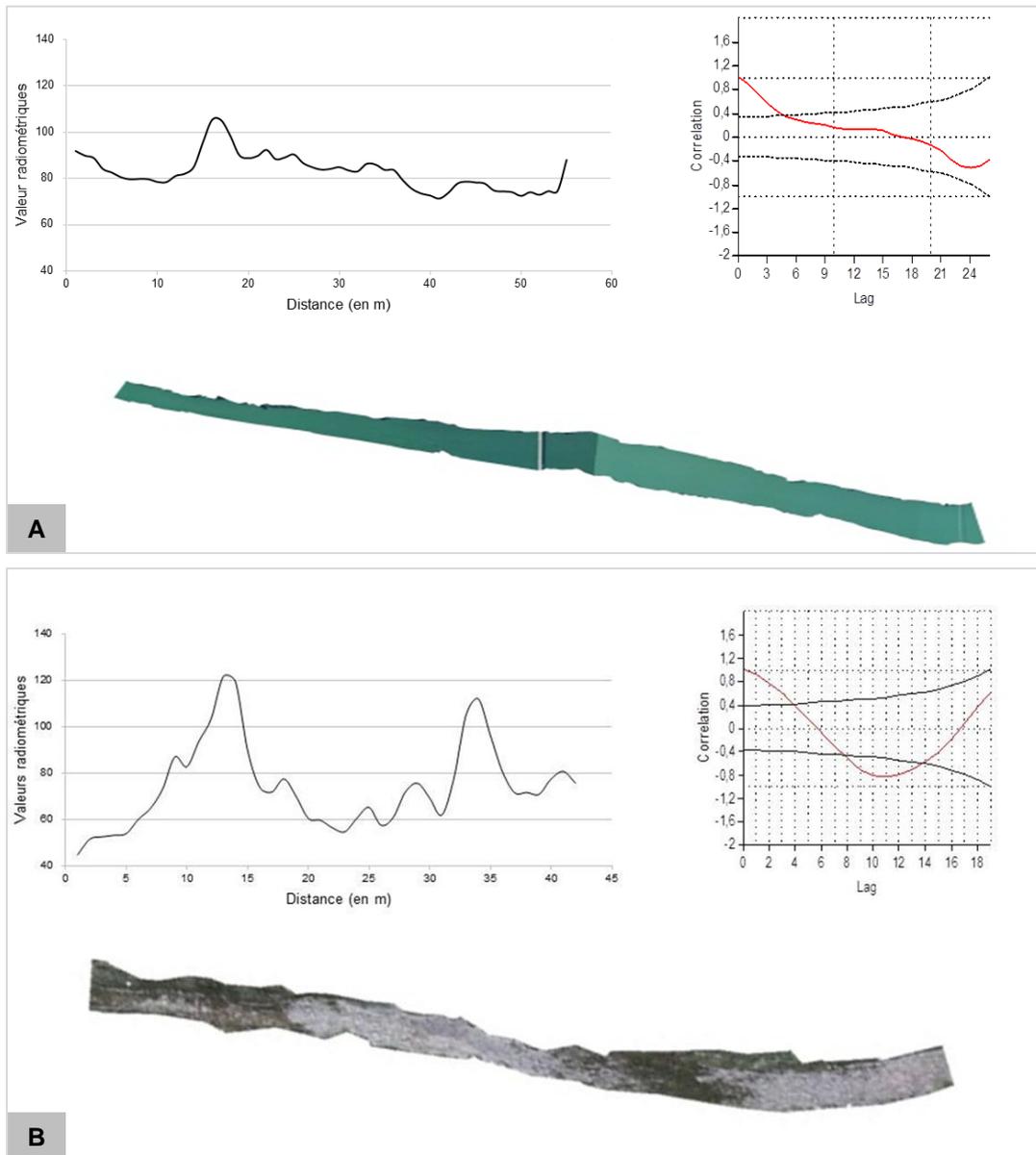


Figure 4.25. Présentation d'un signal non périodique (A) (structure homogène) et d'un signal périodique avec une alternance des faciès (B).

Chenal en eau



Chenal en eau segmenté

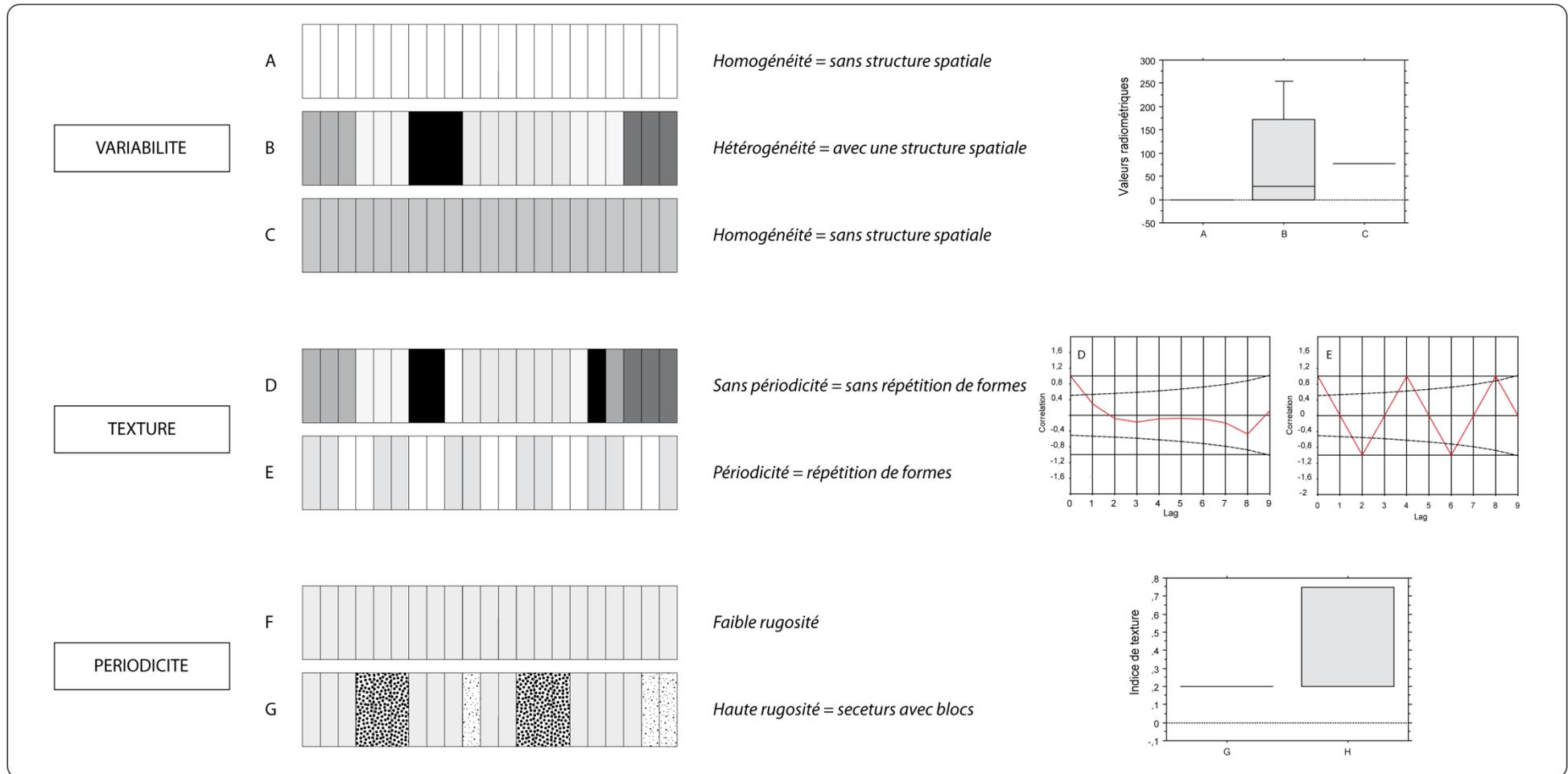
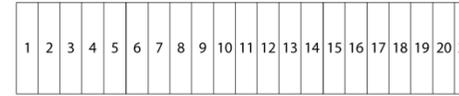


Figure 4.26. Clé de détermination pour l'étude des habitats aquatiques de manière longitudinale.



Partie 5. Conclusion générale

A. Rappel des objectifs de la thèse

B. Apports méthodologiques et pratiques

1. L'imagerie en géomorphologie fluviale : un avenir prometteur
2. Une base de données à l'échelle du bassin rhodanien
3. Les intérêts opérationnels

C. Perspectives scientifiques

Après avoir rappelé les objectifs, cette dernière partie propose un bilan des travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse.

Les résultats principalement méthodologiques de cette thèse de géographie présentent plusieurs avancées significatives. Cela concerne en particulier l'extraction des métriques d'état physique des masses d'eau qui sont obtenues de manière systématique et homogène à l'échelle d'un réseau hydrographique d'importance régionale. Les apports de ce travail sont également d'ordre opérationnel. Certains des indicateurs obtenus sont directement exploitables par les gestionnaires, en particulier l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse en charge de la mise en œuvre de la DCE.

De ce travail découlent de nouvelles pistes d'études s'appuyant sur l'interprétation des données à l'échelle régionale, sur l'utilisation d'autres données brutes, dont la gamme disponible est sans cesse en renouvellement.

A. Rappel des objectifs de la thèse

Les corridors fluviaux sont, depuis déjà plusieurs décennies, l'objet d'études scientifiques menées dans des disciplines diverses telles que la biologie, l'hydrologie, la sociologie, l'écologie, la géomorphologie, la géographie humaine.... En géomorphologie fluviale, l'analyse de la bibliographie montre que les méthodes d'acquisition des données, notamment *in situ*, sont nombreuses et qu'elles ont permis de consolider les connaissances sur le fonctionnement des milieux aquatiques. Mais, une large part de ces connaissances est basée sur l'étude d'un nombre limité de tronçons ou de sous bassins versants. Ainsi, dans le bassin rhodanien, certaines rivières sont bien plus étudiées que d'autres (Tableau 5.1). C'est le cas notamment de l'Ain (Amoros et al., 1986 ; Benacchio, en cours ; Bravard, 1989 ; Dufour, 2005 ; Lejot, 2008 ; Magne et al., 1989 ; Piégay, 1995 ; Piégay et al., 2000 ; Rollet, 2007 ; Wawrzyniak et al., soumis), de la Drôme (Belletti et al., 2012 ; Bertrand et al., soumis ; Liébault, 2003 ; Toone et al., 2012 ; Wawrzyniak et al., soumis ; Wiederkehr et al., 2010b), ou même de la Durance (Chaponniere, 2004 ; Chapuis, 2012 ; Juramy et Monfort, 1987 ; Miramont, 1998).

Tableau 5.1. Nombre de publications scientifiques sur la période 1970 – 2013 ayant pour mots clefs : « Nom de la rivière » et « Fluvial geomorphology » (Source : Elsevier, base non exhaustive).

Nombre de citations	Nom de cours d'eau (nombre de citations)
[50 ; ...[Rhône (89)
[40 ; 49[Ain (48)
[30 ; 39[Drôme (34)
[20 ; 29[Ardèche (20) ; Gard (22) ; Durance (25)
[10 ; 19[Isère (12) ; Ouvèze (13)
[0 ; 9[Saône (8) ; Doubs (7) ; Arve (8) ; Fier (4)

Or les obligations légales, liées en particulier à la mise en place de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, rendent nécessaire l'extension du champ d'investigation à une échelle plus large, celle des grands bassins fluviaux (e.g. l'ensemble du bassin rhodanien). Ces contraintes réglementaires expliquent en partie l'intérêt récent de la communauté scientifique pour ces questions (Chandesris et al., 2007, 2008 ; Tormos, 2010 ; Valette et al., 2008). L'objectif de ce travail s'inscrit dans cette démarche : il s'agit de produire de nouvelles méthodes d'acquisition de l'information à une échelle régionale et de proposer ainsi les mêmes indicateurs sur l'ensemble du réseau. Pour cela, nous avons analysé la pertinence de la caractérisation des réseaux hydrographiques à partir d'outils géomatiques selon trois axes :

1. définition d'une **méthode basée sur des outils géomatiques** ayant pour but de **renseigner des indicateurs** de la qualité physique des masses d'eau,
2. constitution d'une **base de données** composée de métriques extraites à l'échelle du tronçon, et permettant l'élaboration de **ces indicateurs**,

3. présentation d'une **première analyse géographique des indicateurs** obtenus pour caractériser un état biophysique.

L'application de ces outils sur des cas pratiques du bassin RMC a permis de lister les avantages et les limites de ces nouveaux outils. Ainsi, les résultats obtenus dans cette thèse permettent de souligner les éléments pouvant être retenus pour réaliser une étude à large échelle et également d'identifier de nouvelles pistes susceptibles d'être poursuivies afin d'affiner cette approche.

B. Apports méthodologiques et pratiques

La géomatique offre un ensemble d'outils largement mobilisés par les géomorphologues. Les progrès réalisés au niveau des logiciels de traitement et de stockage des données spatiales, la plus grande disponibilité des données, leur meilleure résolution sont autant d'éléments qui permettent de réaliser des études à large échelle s'appuyant sur des données homogènes disponibles sur des linéaires fluviaux de plusieurs milliers de kilomètres. L'accès à ces données est rendu plus facile, car l'offre est plus vaste et, par exemple, l'IGN met maintenant à disposition des laboratoires de recherche une grande partie de ses bases de données. Le développement de travaux dans ce domaine devrait offrir à l'utilisateur, dans les années à venir, de nouvelles possibilités de traitement sans doute plus rapide et à des coûts de plus en plus faibles. C'est pourquoi les limites rencontrées dans cette thèse sont pour la plupart temporaires, laissant présager à moyen voire court termes de nouvelles solutions.

1. L'imagerie en géomorphologie fluviale : un avenir prometteur

Les travaux géomorphologiques dans le domaine de l'imagerie sont en plein essor (Carbonneau et al., 2012). Initialement, l'objectif était de détecter tel ou tel paramètre bien souvent sur une seule image. Mais depuis une quinzaine d'années, nous observons une multiplication des approches avec la combinaison de plusieurs techniques d'imagerie (LIDAR, images multispectrales ou hyperspectrales) (Bryant et Gilvear, 1999 ; Marcus et al., 2003 ; Puestow et al., 2001), et la recherche d'un nombre accru de paramètres décrits, comme les restitutions en trois dimensions à partir de photogrammétrie bathymétrique ou de MNT à haute résolution (Butler et al., 2002 ; Lejot et al., 2007 ; Westaway et al., 2000, 2001, 2003).

La question géographique des structures spatiales à petite échelle est encore peu abordée. Les typologies conduites dans le cadre d'études régionalisées (Andriamahefa, 1999 ; Reinfelds et al., 2004), s'appuient rarement sur des images. En effet, la plupart d'entre elles reposent sur des mesures *in situ* collectées à partir d'une série de tronçons échantillonnés (Kondolf et al., 2003 ; Schmitt, 2001 ; Schmitt et al., 2007). L'approche régionalisée conduite dans le cadre du projet SYRAH (SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des cours d'eau) (Chandesris et al., 2007, 2008) apporte des résultats originaux au niveau régional s'appuyant principalement sur les données vectorielles. Toutefois, l'utilisation de l'imagerie est un outil complémentaire fournissant des informations supplémentaires intéressantes permettant par exemple une caractérisation de l'occupation des sols (Tormos et al., 2011), des habitats piscicoles ou de la végétation riveraine que ne permettent pas les données vectorielles à notre disposition. Actuellement des travaux sont engagés sur le bassin de la Saône, qui à partir de l'image vont permettre une meilleure compréhension des relations existant entre le « *milieu terrestre (occupation du sol dans les corridors rivulaires et le bassin versant) et la qualité des cours d'eau (biologie et physicochimie)* » (Lalande, En cours).

Grâce aux progrès techniques de ces dernières années et à la disponibilité de nouvelles informations, des travaux qui n'étaient pas envisageables il y a encore peu de temps sont maintenant possibles. Les procédures de classification orientée-objet, comme celles proposées par *Envi Zoom* d'ITT ou *eCognition* de Definiens, permettent d'atteindre des résultats très satisfaisants en terme de détection des taches paysagères à partir d'images certes relativement pauvres d'un point de vue spectral, mais avec une résolution spatiale actuellement inégalée à une telle échelle géographique (Geerling et al., 2008 ; Karsenty, 2005 ; Perez Correa, 2004). Le lancement de nouvelles plates-formes telles que Pléiade devrait encore améliorer la qualité des résultats avec une convergence des très hautes résolutions, spatiale, temporelle et spectrale. Intégrant la forme de la tache dans la procédure de détection ou en associant cette démarche initiale à des requêtes de sélection intégrant la contiguïté des taches (le chenal principal est constitué d'objets « eau » qui se touchent, les bancs de galets jouxtent systématiquement le chenal en eau), ces procédures automatisées offrent ainsi des résultats proches de ceux résultant d'une photo-interprétation traditionnelle, et ce dans un laps de temps compatible avec une analyse à l'échelle d'un réseau hydrographique de plusieurs milliers de kilomètres.

L'étude comparative des différents couples capteurs / vecteurs réalisée en 2008 a présenté la BD Ortho[®] de l'IGN comme le support le plus pertinent en termes de coût, de résolution spatiale, spectrale et temporelle pour évaluer la qualité physique du réseau hydrographique du bassin rhodanien. Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont permis de tester les avantages et les limites de l'utilisation de ces orthophotographies. Ainsi, une méthode automatique d'extraction de la bande active par classification a été établie et testée sur le linéaire de la Drôme présentant des résultats globalement très probants (91% de la surface est bien classée). En revanche, l'application de la classification unique à l'ensemble du bassin RMC n'a pas donné les résultats escomptés. La production d'une cartographie exhaustive des objets « eau », « bancs de sédiments » et « végétation » sur l'ensemble du bassin rhodanien n'est en l'état pas réalisable dans un temps acceptable. En effet, l'application de règles de classification a montré que les résultats n'étaient pas suffisamment homogènes au regard de nos exigences et nécessitaient un « nettoyage » manuel très long. Cela est dû 1) aux différences de dates de prise de vue des orthophotographies, 2) aux différences de contrastes de ces orthophotographies et 3) à la forte variabilité de l'occupation du sol, de la profondeur de l'eau et au relief (ensoleillement). La mise à disposition récente de la BD Ortho[®] IRC offre de nouvelles perspectives et devrait conduire à relancer de nouvelles démarches de classification.

L'extraction d'indicateurs à partir des images présente certaines limites : liées, d'une part, à la résolution des images et, d'autre part, aux caractéristiques des systèmes fluviaux. En dessous d'une certaine taille, les caractères intra-chenaux, voire le chenal lui-même, ne sont plus détectables. Par conséquent, des problèmes apparaissent en tête de réseau, où la détection d'objets longs et étroits (chenal en eau, linéaire ripicole) devient délicate. De fait, afin de renforcer la procédure de classification, celle-ci doit par exemple intégrer la taille des objets à détecter le long du continuum fluvial. Ainsi, des abaques sont établis liant la largeur du cours d'eau à la taille des objets (eau, bancs de galets et végétation) à identifier (Wiederkehr et al., 2009).

Nous avons également testé les potentialités de l'orthophotographie, et en particulier de l'utilisation des valeurs radiométriques, pour identifier les méso-habitats aquatiques. Les résultats obtenus sur la Drôme sont encourageants, mais ce travail ne peut être étendu à l'ensemble du bassin rhodanien, et ce pour plusieurs raisons : temps de traitement relativement long, qualité hétérogène des images sur l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien. Les résultats obtenus à partir des orthophotographies en matière de caractérisation des méso-habitats et de détermination des styles fluviaux de la Drôme montrent que l'apport des images par rapport aux approches uniquement *in situ* ou basées sur des données vectorielles (type BD Topo[®]) est substantiel. L'homogénéisation des données et le renouvellement du jeu d'orthophotographies tous les trois ou cinq ans par l'IGN permettent d'envisager de faire un suivi régulier des formes, celles-ci pouvant être comparées aux données déjà existantes. Raso (2011) a prolongé ce travail en se penchant sur la question de l'identification diachronique des méso-habitats. L'un des autres avantages de l'utilisation de l'image est la possibilité de semi-automatiser les traitements pour extraire les métriques de caractérisation, ce qui permet un gain de temps considérable compte tenu du linéaire à traiter. Le présent travail ouvre des pistes en termes de métriques de caractérisation de l'habitat. Celles-ci peuvent être répertoriées et intégrées à un SIG, permettant par la suite de compléter des modèles d'habitats existants. Pour l'instant, il n'est pas envisageable d'identifier les méso-habitats à partir de l'image lorsque le débit est trop élevé. En effet, le chenal en eau rend alors compte d'une structure homogène longitudinalement, la variabilité des données radiométriques dans ces cas-là ne permet pas de visualiser des changements de forme.

Si les avancées technologiques de ces dernières années ont permis de développer et d'améliorer les outils permettant une caractérisation physique des réseaux à large échelle, l'utilisation des outils géomatiques ne résout pas tous les problèmes. Par exemple, dans les parties amont du bassin, la résolution spatiale des images ne permet pas toujours de travailler sur des bandes actives étroites. Dans ce cas, l'image est une source d'information insuffisante, et la réalisation de mesures *in situ* est un complément nécessaire. L'utilisation de certaines plates-formes, comme le drone, reste un complément intéressant aux images de la BD Ortho[®], mais leur utilisation sur de grandes surfaces n'est pas envisageable, à l'heure actuelle, pour des raisons techniques ou financières (Figure 1.6).

2. Une base de données à l'échelle du bassin rhodanien

Constituer une base de données à l'échelle d'un réseau hydrographique et sans discontinuité longitudinale implique que la procédure soit bien normalisée. Pour cela, les outils géomatiques offrent probablement la solution technique la plus pertinente tant en termes de normalisation que d'efforts financiers et humains pour obtenir cette information. Un des avantages de cette approche est la possibilité de stocker des données dans un système d'information à référence spatiale et de facilement revenir sur celles-ci. Ainsi, à l'aide de nouvelles requêtes, de nouveaux indicateurs peuvent être construits en combinant différentes métriques de la bibliothèque, qui s'enrichit donc de façon cumulative. De plus, l'intérêt de la localisation des objets est de pouvoir les analyser en fonction de leur position.

La mise en place d'une telle démarche nécessite de réaliser initialement une série de tests plus ou moins longue. Si le démarrage est lourd et nécessite une infrastructure informatique importante, la détection des objets géographiques et le calcul de métriques sur un réseau hydrographique de plusieurs milliers de kilomètres offrent ensuite un champ de recherche très large et un outil directement opérationnel.

L'utilisation des données images n'étant pas possible à l'échelle du réseau, dans le temps qui nous était imparti, nous avons eu recours à d'autres données vectorielles (BD Topo[®]) afin de disposer des polygones représentant la bande active. Nous avons réussi à extraire des métriques de manière continue sur un vaste réseau hydrographique. Jusqu'à présent l'essentiel des travaux réalisés à une telle échelle était appliqué à des données stationnelles, qui étaient par la suite extrapolées (Schmitt et al., 2007). L'emploi de ces métriques combinées ou non à des métriques issues d'autres bases de données (RHT du Cemagref - IRSTEA, par exemple) permet de créer des indicateurs d'état physique. Ces indicateurs sont établis selon la même méthode et par le même opérateur, ce qui permet d'obtenir des résultats homogènes sur l'ensemble du réseau RMC et par conséquent de réaliser une étude à large échelle plus précise que celle fournie par des données ponctuelles. Cela permet notamment de localiser les discontinuités sur le continuum, de les caractériser, ce qui n'était pas possible auparavant, et, de fait, de déterminer des tronçons homogènes. Les discontinuités géomorphologiques sont parfois plus importantes que les tronçons homogènes et les localiser est ainsi un enjeu scientifique et opérationnel important.

La présente démarche est encore relativement pauvre en métriques disponibles comparativement aux approches *in situ*, mais elle offre l'avantage de produire une information exhaustive sur tout le *continuum* fluvial. Cette particularité est essentielle notamment lorsque l'on souhaite faire un travail de recensement ou effectuer des requêtes d'identification des sites spécifiques répartis au sein d'un vaste réseau ou territoire comme c'est le cas pour les géomorphosites.

Combiner ces informations avec les informations SYRAH ou les informations issues de la caractérisation du corridor riverain est aussi une nouvelle étape à franchir. Il serait intéressant de réfléchir à un référentiel commun en termes de linéaires de cours d'eau, mais aussi en termes d'unités spatiales de référence. En effet, l'équipe SYRAH (Chandesris et al., 2007, 2008 ; Valette et al., 2008) a également utilisé comme unité de base pour extraire des informations des tronçons géomorphologiques homogènes sur l'ensemble du territoire national. Les résultats obtenus par leur méthode manuelle de sectorisation ne distinguent pas les tronçons en fonction du tracé en plan, mais en fonction de la morphologie de la vallée. De fait, un même tronçon géomorphologique peut abriter des sections endiguées et des sections libres, ce qui est significativement différent en terme d'état physique. L'analyse géomorphologique devrait ainsi être considérée non pas à l'échelle du tronçon (au sens de SYRAH), mais à l'échelle d'une section (homogène en termes de tracé en plan) pour déterminer des indicateurs physiques. Ce travail fournit ainsi au niveau du bassin du Rhône ce découpage que SYRAH peut directement intégrer.

3. Les intérêts opérationnels

Ces travaux doivent servir à renseigner des indicateurs de qualité physique des masses d'eau afin de caractériser les pressions anthropiques sur l'hydromorphologie dans le cadre de la mise en place de la DCE, à l'échelle du réseau hydrographique du bassin du Rhône (en complément des démarches nationales en cours : SYRAH, CARHYCE). Mais les outils développés sont aussi mobilisables dans le cadre de SAGE ou de Contrats de Rivière en matière de diagnostic et de planification. Cette approche permet d'optimiser l'acquisition et le stockage de données dans le but d'établir des diagnostics réguliers de l'état biophysique à large échelle et d'alimenter des modèles permettant d'établir des scénarios d'évolution (Gregory et al., 2012). L'intérêt de cette procédure repose sur la qualité et la pertinence des données acquises à l'échelle de grands bassins. Les métriques sont extraites de manière continue et non plus à l'échelle de la station, offrant ainsi une réelle amélioration quant aux travaux de sectorisation qui sont d'autant plus objectifs notamment dans la détection des discontinuités. La mise à disposition de ces données aide à localiser facilement les zones d'interventions et à améliorer les connaissances hydromorphologiques. De plus, la semi-automatisation de cette méthode permet d'envisager une utilisation sur d'autres bassins et de compléter la base de données par de nouvelles métriques au fur et à mesure que des questions se posent. La méthode mise en place permet de réaliser une caractérisation physique d'un corridor fluvial, de comprendre ainsi l'organisation longitudinale de ses formes et de définir des indicateurs d'état ou de suivi hydromorphologiques. Ainsi, la détermination des styles permet non seulement de répondre à des questionnements scientifiques, mais aussi d'apporter des précisions opérationnelles en termes de priorité d'actions, en identifiant les zones présentant des caractéristiques biophysiques particulières (fort potentiel d'érosion latérale ou forte diversité d'habitats par exemple). Nous avons ainsi listé les documents que nous pouvons transmettre à l'Agence de l'Eau lui fournissant la donnée la plus opérationnelle possible (Tableau 5.2).

Tableau 5.2. Synthèse des documents livrables à l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Programmes de mesures de l'AERMC		Réponses (documents) que nous pouvons apporter		Secteurs
Continuité	Suppression d'ouvrages, mise en place de dispositifs de franchissement montaison et / ou dévalaison	Carte des styles fluviaux (par TGH)	Localisation des barrages hydro-électriques (types B11 / B13)	Bassin RMC
	Gérer l'équilibre sédimentaire	Amélioration de la gestion des débits en faveur des crues morphogènes, suppression ou aménagement des ouvrages bloquant le transport solide, limitation du transport solide dit "néfaste", réalisation d'un programme de recharge sédimentaire	Carte de la largeur de bande active adimensionnelle (par TGH)	Indication de la surlargeur
Carte des écarts interquartiles de la largeur de bande active adimensionnelle (par TGH)			Écart interquartile de la largeur de bande active adimensionnelle	Bassin RMC
Carte des débits (par TGH)			Débits biennaux (en m ³ /s)	Bassin RMC
Carte des pentes (par TGH)				Bassin RMC
Carte des puissances spécifiques et brutes				Bassin RMC
Carte des densités d'écotone			Surfaces de ripisylves en contact avec le chenal en eau	Drôme
Préserver / restaurer les habitats	Restauration des habitats du lit mineur, reconnexion des annexes et milieux humides, restauration du fonctionnement de l'espace de liberté, des berges et ripisylves	Carte des styles fluviaux (par TGH)	Tronçons rectilignes	Bassin RMC
			Taux de confinement	Bassin RMC
		Carte de la prédiction latérale potentielle		Bassin RMC
		Diversité des habitats aquatiques		Drôme
	Carte des densités d'écotone	Densité de contact eau/ripisylve (pour les questions de pollutions diffuses)	Drôme	
Hydrologie	Assurer le fonctionnement des ouvrages hydrauliques, des débits réservés, le maintien du régime hydrologique	Carte des styles fluviaux (par TGH)	Plans d'eau / ouvrages de stockage d'eau	Bassin RMC

C. Perspectives scientifiques

Depuis plusieurs années, les travaux en géomatique permettant de réaliser un état des lieux à l'échelle d'un réseau hydrographique se multiplient (Chandesris et al., 2007 ; Tormos, 2010). L'approche semi-automatique proposée ici est reproductible et constitue les prémices d'un système d'informations du réseau hydrographique du Rhône. En effet, nous avons conçu une méthode pouvant être alimentée par d'autres données vectorielles ou attributaires. Bien qu'ayant rencontré de nombreuses difficultés en termes de traitement et de stockage de l'information, nous avons acquis des résultats ouvrant des perspectives d'application de cette méthode à d'autres questions scientifiques et à d'autres secteurs géographiques. Le canevas créé peut s'appliquer à d'autres réseaux hydrographiques et ainsi favoriser la réalisation des études synchroniques interbassins ou diachroniques. Ces outils sont susceptibles d'être utilisés à des fins scientifiques et ouvrent ainsi la voie à l'élaboration de modèles géomorphologiques régionalisés et à l'analyse des liens existant entre une géométrie fluviale donnée et les paramètres de contrôle amont.

La réalisation d'un inventaire le plus continu possible sur un réseau fluvial étendu semble aujourd'hui possible. L'enjeu est maintenant d'extraire de nouvelles métriques. Cette base de données pourrait être facilement alimentée par d'autres données vectorielles ou *rasters* qui serviront à créer d'autres indicateurs donnant l'occasion d'aborder la structure paysagère des corridors fluviaux ou la caractérisation des habitats piscicoles, voire leur évolution temporelle. Cette approche permettra d'extraire des métriques sur les tronçons SYRAH ou sur d'autres tronçons considérés comme homogènes en fonction de métriques données.

De plus, la question de la régionalisation de la surlargeur du lit, qui est un indicateur des apports sédimentaires, eux-mêmes associés à des sources sédimentaires, peut être réellement envisagée. Ainsi l'analyse de la variabilité intra-tronçon de la surlargeur permettrait la détection des secteurs rectifiés ou endigués si le chenal est linéaire. Il s'agit d'une piste intéressante à explorer concernant l'étude des pressions liées aux aménagements. De plus, Bertrand (en cours) explore cette thématique en liant la surlargeur du lit aux sources sédimentaires, dans les Alpes du Sud. Il est également envisageable de distinguer les secteurs encore naturels où la libre divagation potentielle est prédite, permettant de cibler les zones où l'espace de liberté doit être préservé, ou d'identifier des secteurs en tresses dont l'intérêt écologique nécessite des actions de préservation (Belletti, en cours).

L'arrivée de nouvelles plates-formes ou de nouveaux capteurs, l'apport du canal infrarouge sur les orthophotographies de l'IGN permettent d'ouvrir de nouvelles voies de développement en imagerie.

- ✓ L'apport du canal IRC, maintenant disponible avec les orthophotographies, devrait permettre d'apporter des informations de meilleure qualité quant à la détection des habitats aquatiques et ce pour une gamme de débits peut-être plus étendue. Ainsi, la cartographie des méso-habitats pourrait être affinée avec davantage de types plus précis.

- ✓ L'analyse des archives de l'IGN, qui dispose d'une campagne tous les 5 à 10 ans, devrait également permettre d'étudier l'évolution des faciès de manière diachronique, et non plus seulement de façon synchronique, et d'aborder rétrospectivement l'impact de certains aménagements sur l'agencement des formes intra-fluviales ou prospectivement l'effet bénéfique ou altérant de certaines actions d'aménagement ou de restauration dans un contexte de suivis.
- ✓ D'autres thématiques de recherche peuvent être envisagées sur l'objet végétation par exemple la détection des espèces arborescentes sur l'ensemble du corridor fluvial rhodanien, détection qui pourrait être plus précise que les données mises à disposition de l'IGN - IFN. Ainsi une carte précise de la ripisylve à l'échelle du réseau rhodanien offrirait de nouvelles pistes de lecture sur l'état écologique des masses d'eau.
- ✓ A terme, le développement de nouvelles plates-formes images devrait permettre de compléter la base de données à partir de *rasters* par exemple (programme d'accompagnement d'ORFEO pour les systèmes Pléiades (composante optique) et Cosmo (composante radar)).
- ✓ Autre enjeu : l'intégration des données LiDAR sur au moins une partie du réseau (plusieurs centaines de km) permettrait ainsi d'intégrer un paramètre clé en géomorphologie, l'altitude. La mise en place de MNT détendancé est un enjeu clé également pour la production de nouveaux indicateurs de caractérisation morphologique des réseaux. Les couvertures LiDAR se multiplient. Les 500 km du Rhône sont couverts, tout comme aujourd'hui le linéaire de la Drôme sur près de 90 km (ce qui n'était pas le cas quand ces travaux ont commencé).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aalto R., Lauer J. W., Dietrich W. E., 2008, "Spatial and temporal dynamics of sediment accumulation and exchange along Strickland River floodplains (Papua New Guinea) over decadal-to-centennial timescales.," *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 113, F1.
- AFNOR., 1992, "Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN), Association française de normalisation, Norme homologuée T 90-350.,"
- AFNOR., 2004, "Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN), Association française de normalisation, Norme homologuée T 90-350.,"
- Agence de l'Eau Loire-Bretagne., 2009, *La protection des milieux aquatiques. L'eau en Loire-Bretagne* 77, 47 p.
- Agence de l'Eau Rhin-Meuse., 1996, *Outil d'évaluation de la qualité du milieu physique synthèse*. Metz, Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 14 p.
- Agence de l'Eau RMC., 1999, *Les outils d'évaluation de la qualité des cours d'eau (S.E.Q). Principes généraux*. Les études des Agences de l'Eau 72, 16 p.
- Alber A., En cours, *L'espace de mobilité des cours d'eau à l'épreuve de la pratique : proposition de développements méthodologiques à l'interface de la géomorphologie fluviale et de l'ingénierie hydraulique*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon II.
- Alber A., Piégay H., 2008, "Développements méthodologiques pour une analyse des discontinuités longitudinales structurant un réseau hydrographique.," in: *SAGEO*. Montpellier.
- Alber A., Piégay H., 2011, "Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France)," *Geomorphology*, 125, 3, 343–360.
- Allen K. R., 1951, "The Horokiwi stream: a study of a trout population.," *New Zealand Marine Department Fisheries Bulletin*, 10, 1–238.
- Allen T. F., Starr T. B., 1982, *Hierarchy. Perspective for ecological complexity*. The University Chicago Press, 310 p .
- Amoros C., Bravard J-P., Castella C., Roux A. L., 1986, "Recherches interdisciplinaires sur les écosystèmes de la Basse-plaine de l'Ain (France) potentialités évolutives et gestion.," *Documents de cartographie écologique*, 29, 17–43.
- Amoros C., Petts G. E., 1993, *Hydrosystèmes fluviaux*. Paris, Masson, 300 p .
- Amoros C., Roux A. L., Reygrobellet J. L., Bravard J. P., Pautou G., 1987, "A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems.," *Regulated Rivers: Research and Management*, 1, 17–36.
- Andriamahefa H., 1999, *Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pression anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versants (volume1)*. Saint Etienne, Thèse de doctorat. Université Jean Monnet, 272 p .
- Archambault V., Dumont B., 2010, "L'indice biologique global normalisé (IBGN) : principes et évolution dans le cadre de la directive cadre européenne sur l'eau.," *Sciences Eaux & Territoires*, 1, 36–39.
- Armitage P. D., Pardo I., 1995, "Impact assessment of regulation at the reach level using macroinvertebrate information from mesohabitats.," *Regulated Rivers: Research and Management*, 10, 2-4, 147–158.
- Arnaud F., Schmitt L., Johnstone K., Hoenen D., Béal D., Piégay H., et al., 2010, *Etude historique des évolutions morphologiques du Vieux Rhin depuis 1800. Rapport de synthèse*. Rapport d'étape semestriel, déc. 2010, Université de Lyon, UMR 5600 CNRS, EDF, 75 p.
- Arscott D. B., Tockner K., Van der Nat D., Ward J. V., 2002, "Aquatic habitat dynamics along a braided Alpine river ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy).," *Ecosystems*, 5, 8, 802–814.
- Arscott D. B., Tockner K., Ward J. V., 2000, "Aquatic habitat diversity along the corridor of an Alpine floodplain river (Fiume Tagliamento, Italy).," *Archiv für Hydrobiologie - Hauptbände*, 149, 4, 679–704.

- Aubry P., Piégay H., 2001, "Pratique de l'analyse de l'autocorrelation spatiale en geomorphologie: definitions operatoires et tests," *Géographie Physique et Quaternaire*, 55, 2, 111–130.
- Baglinière J. L., Bourgois J. M., Champigneulle A., 1982, "Densité des populations de truite commune (*Salmo trutta* L.) et de juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) sur le cours principal du Scorff (Bretagne): préférences physiques et variations annuelles (1976-1980)," *Acta Oecologica*, 3, 3, 241–256.
- Bailey K. D., 1994, *Typologies and taxonomies: an introduction to classification techniques*. Thousand Oaks, California, Sage Publications, 90 p .
- Baran P., Dauba F., Delacoste M., Lascaux J., 1993, "Essais d'évaluation quantitative du potentiel halieutique d'une rivière à salmonidés à partir de données de l'habitat physique," 15–38 in: *1er forum Halieumétrique*. Rennes.
- Baud P., Bourgeat S., Bras C., 2003, *Dictionnaire de géographie*. Paris, Hatier, 543 p .
- Bayley P.B., Li H. W., 1992, "Riverine fishes," 251–281 in: *The rivers handbook*. Oxford, Blackwell Scientific.
- Beaufrère C., Dabos P., Rebillard J.-P., 2005, *Evaluation de l'anthropisation des cours d'eau. Retour d'expérience sur l'acquisition des données sur le bassin Adour-Garonne (France)*.
- Beaufrère C., Dabos P., Rebillard J.-P., 2007, "Evaluation de l'état de l'hydromorphologie des cours d'eau: retour d'expérience sur le bassin Adour-Garonne (France)," *Géographie Physique et Quaternaire*, 61, 1, 55–74.
- Beechie T. J., Liermann M., Pollock M. M., Baker S., Davies J., 2006, "Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems," *Geomorphology*, 78, 1-2, 124–141.
- Béguin M., Pumain D., 2009, *La représentation des données géographiques: Statistique et cartographie*. Paris, Armand Colin, 192 p .
- Bel Hadj Ali A., 2001, *Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques*. Marne-la-Vallée, Thèse de doctorat. Université de Marne-La-Vallée, 210 p .
- Belletti B., En cours, *Evolution contemporaine et caractérisation des habitats aquatiques et riverains des tronçons fluviaux en tresses du bassin du Rhône*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Lyon 3.
- Belletti B., Dufour S., Piégay H., 2012, "Regional variability of aquatic pattern in braided reaches (example of the French Rhône basin)," *Hydrobiologia*.
- Belliard J., Gorges G., Le Pichon Céline, Tales E., 2009, *Le peuplement de poissons du bassin de la Seine. Comprendre son évolution sous l'impact des changements générés par l'homme ou la nature*. Paris, Programme PIREN - SEINE. Agence de l'Eau Seine-Normandie, 44 p.
- Benacchio V., En cours, *Etude des facteurs limitant la prédiction de la bathymétrie par imagerie: approche expérimentale à partir d'un capteur in situ sur la basse vallée de l'Ain*. Lyon, Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- Bernard C., 1999, *Ondelettes et problèmes mal posés: la mesure du flot optique et l'interpolation irrégulière*. Saclay, Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique, 239 p .
- Bertrand M., En cours, *Approches régionales de la susceptibilité torrentielle (alpes du sud)*. Lyon, Thèse de doctorat. ENS Lyon.
- Bertrand M., Piégay H., Pont D., Liébault F., Sauquet E., Soumis, "Sensitivity analysis of environmental changes associated with riverscape evolutions following sediment reintroduction: Geomatic approach on the Drôme River network, France," *The International Journal of River Basin Management*.
- Blandin P., Lamotte M., 1985, "Ecologie des systèmes et aménagement: fondements théoriques et principes méthodologiques," 139–162 in: *Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire*. Paris, Masson.
- Blondel J., 1995, *Biogéographie: Approche écologique et évolutive*. Paris, Dunod, 297 p .
- Bo S., Han X., 2010, "Parameter Selection for Segmentation in Object-Oriented Classification of Remotely Sensed Imagery," 876–879 in: *Intelligent Computation Technology and Automation, International Conference on. IEEE*.
- Borsányi P., Alfredsen K., Harby A., Ugedal O., Kraxner C., 2004, "A Meso-Scale Habitat Classification Method for Production Modelling of Atlantic Salmon in Norway," *Hydroécologie Appliquée*, 14, 1, 119–138.
- Bovee K. D., 1982, *Stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Washington, DC, USDI Fish and Wildlife Service Instream Flow Information Paper #12, FWS/OBS-82/26. 248 p.
- Bovee K. D., Lamb B. L., Bartholow J. M., Stalnaker Clair B., Taylor J., Henriksen J., 1998, *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Geological Survey,

- Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004., 131 p.
- Brasington J., Langham J., Rumsby B., 2003, "Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport," *Geomorphology*, 53, 3-4, 299–316.
- Bravard J. P., 1989, "La métamorphose des rivières des Alpes française a la fin du Moyen-Age et a l'époque moderne," *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 145–157.
- Bravard J. P., Amoros C., Pautou G., 1986, "Impacts 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.," *Oikos*, 47, 92–111.
- Bravard J. P., Clemens A., 2008, *Le Rhône en 100 questions*. Lyon, ZABR, GRAIE, 295 p .
- Bravard J. P., Petit F., 1997, *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*. Paris, Armand Colin, 222 p .
- Brice J. C., 1960, "Index for description of channel braiding," *Geological Society of America Bulletin*, 71, 1833.
- Brice J. C., 1964, *Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska*. USGS Professional Paper 422 D, 41 p.
- Bridcut E. E., Giller P. S., 1993, "Diet variability in relation to season and habitat utilisation in brown trout, *Salmo trutta* L., in a southern Irish stream.," 17–24 in: *Production of juvenile Atlantic salmon, Salmo salar, in natural waters*. Canada, Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Science.
- 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*, 29, 3-4, 307–321.
- Bryce S. A., Clarke S. E., 1996, "Landscape-level ecological regions: Linking state-level ecoregion frameworks with stream habitat classifications.," *Environmental Management*, 20, 3, 297–311.
- Burel F., Baudry J., 1999, *Ecologie du paysage : Concepts, méthodes et applications*. Paris, Tech.& Doc./Lavoisier, 360 p .
- Burke Hubbard B., 2000, *Ondes et ondelettes. La saga d'un outil mathématique*. Paris, Belin, 236 p .
- Butler J. B., Lane S. N., Chandler J. H., Porfiri K., 2002, "Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments.," *Photogrammetric Record*, 17, 99, 419–439.
- Caloz R., Collet C., 2001, *Précis de télédétection. Volume 3, Traitements numériques d'images de télédétection*. Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec, 398 p .
- Carbonneau P. E., Lane S. N., Bergeron N. E., 2006, "Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments.," *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 11, 1413–1423.
- Carbonneau P. E., Piégay H., Lejot J., Dunford R., Michel K., 2012, "Hyperspatial Imagery in Riverine Environments," 163–192 in: *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Carbonneau P., Lane S., Bergeron N., 2004, "Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery," *Water Resources Research*, 40, 7.
- Carpenter K. E., 1928, *Life in Inland Waters: With Especial Reference to Animals*. London, Sidgwick & Jackson, ltd, 267 p .
- Champoux P., Bedard Y., 1992, "Notions fondamentales d'analyse spatiale et les opérateurs spatiaux," *Journal des Sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse spatiale*, 2, 2, 187–208.
- Chandesris A., Malavoi J. R., Souchon Y., Wasson J. G., Mengin N., 2007, "Le système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau (SYRAH CE) : un outil multi-échelles d'aide à la décision pour la gestion des cours d'eau.," *Ingénieries-Eau Agriculture et Territoires*, 50, 77–80.
- Chandesris André, Mengin N., Malavoi J.-R., Souchon Yves, Pella H., Wasson J.-G., 2008, *Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau - Atlas à large échelle*. Cemagref Lyon BEA/LHQ et Ministère de l'aménagement du Territoire et de l'Environnement, Direction de l'Eau, 64 p.
- Chaponnière P., 2004, *Télédétection et bathymétrie de rivières: Application à la Durance*. Mémoire. ENSG, 94 p .
- Chapuis M., 2012, *Mobilité des sédiments fluviaux: grossiers dans les systèmes fortement anthropisés: éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance*. Aix-en-Provence, Thèse de doctorat. Université d'Aix Marseille.
- Charrier P., Honecker U., Kinsinger C., Löffler E., 2002, "Gestion des bassins versants transfrontaliers: la comparaison des méthodes

- d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau sur le bassin Moselle - Sarre.," *Moselle 200é*, XXVil, 1-2, 107–122.
- Clément P., Piégay H., 2003, "Statistics and Fluvial Geomorphology," 597–630 in: M. G. Kondolf & H. Piégay (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Clerici N., Weissteiner C. J., Paracchini M. L., Strobl P., 2011, *Riparian zones: where green and blue networks meet. Pan-European zonation modelling based on remote sensing and GIS*. JRC Scientific and Technical Reports, 62 p.
- Cohen P., 1998, *Régionalisation de l'habitat physique du poisson: Approche multi-scalaire et application au bassin de la Loire, France*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon I, 251 p .
- Collectif Michelin., 2012, *Guide Vert Provence*. Paris, Michelin, 470 p .
- Collectif ONEMA., 2010, *Recueil d'expériences sur la restauration hydromorphologique des cours d'eau*. ONEMA.
http://www.onema.fr/Hydromorphologie,510
- Constantine J. A., Dunne T., 2008, "Meander cutoff and the controls on the production of oxbow lakes," *Geology*, 36, 1, 23–26.
- Corbonnois J., Zumstein J. F., 1994, "Proposition de typologie des cours d'eau. Application au réseau hydrographique du Nord-Est de la France (bassin de la Moselle)," *Revue de géographie alpine*, 82, 2, 15–24.
- Cottet M., 2010, *La perception des bras morts fluviaux*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Jean Moulin Lyon III, 359 p .
- Cottet M., Honegger A., Piégay H., 2010, "Comprendre la perception des paysages de bras morts: un préalable aux projets de restauration écologique.," *Norois*, 3, 85–103.
- Dajoz R., 1996, *Précis d'écologie*. Paris, Dunod, 551 p .
- Davis W. M., 1899, "The geographical cycle.," *The Geographical Journal*, 14, 5, 481–504.
- Delacoste M., Baran P., Dauba F., Belaud A., 1993, "Etude du macrohabitat de reproduction de la truite commune (*Salmo trutta* L.) dans une rivière pyrénéenne, la Neste du Louron. Evaluation d'un potentiel de l'habitat physique de reproduction," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 331, 341–356.
- Delacoste M., Baran P., Lek S., Lascaux J. M., 1995, "Classification et clé de détermination des faciès d'écoulements en rivières de montagne," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337-338-339, 149–156.
- Demaeyer J., Bebronne M., Forthomme S., 2003, "Les ondelettes," 5 in: *Le Printemps des sciences*.
- Denègre J., Salgé F., 1996, *Les Systèmes d'Information Géographique*. Paris, Presses Universitaires de France, 127 p .
- Derechef A., 2010, *Mise en place du système d'information géographique pour l'application de la DCE sur le bassin de la Saône. Evaluation des protocoles d'acquisition des données d'occupation du sol dans les corridors rivulaires à partir d'images THRS*. Montpellier, Mémoire Master 2. Montpellier SupAgro, 51 p .
- Desjardins R., 2000, *La télédétection: perspective analytique*. Paris, ESTEM, 226 p .
- Dodov B. A., Foufoula-Georgiou E., 2006, "Floodplain Morphometry Extraction From a High-Resolution Digital Elevation Model: A Simple Algorithm for Regional Analysis Studies," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3, 3, 410–413.
- Ducrot D., 2005, *Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources. Extraction de caractéristiques du paysage*. Toulouse, Habilitation à diriger des recherches. INP Toulouse, 240 p .
- Dufour S., 2005, *Contrôles naturels anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Jean Moulin Lyon III, 243 p .
- Dufour S., Barsoum N., Muller E., Piégay H., 2007, "Effects of channel confinement on pioneer woody vegetation structure, composition and diversity along the River Drome (SE France)," *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 8, 1244–1256.
- Dufour S., Muller E., Straatsma M., Corgne S., 2012, "Image Utilisation for the Study and Management of Riparian Vegetation: Overview and Applications," 215–239 in: Patrice E. Carbonneau & Hervé Piégay (Eds.), *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Dufour S., Rinaldi M., Piégay H., Michalon A., Soumis, "Changes in fluvial landscape structure and diversity in response to interplayed geomorphic and human factors along the Magra River (Central – Northern River).," *Landscape and Urban Planning*.
- Eisner A., Young C., Schneider M., Kopecki I., 2005, "MesoCASiMiR: New mapping method and comparison with other current

- approaches,” 65–95 in: *COST 626 European Aquatic Modelling Network*. Silkeborg, Danemark.
- Elliott J. M., 1986, “Spatial Distribution and Behavioural Movements of Migratory Trout *Salmo trutta* in a Lake District Stream,” *Journal of Animal Ecology*, 55, 3, 907–922.
- Ferreira J., Padua J., Hugues S. J., Cortes R. M., Varandas S., Holmes N., et al., 2011, “Adapting and adopting River Habitat Survey: Problems and solutions for fluvial hydromorphological assessment in Portugal,” *Limnetica*, 30, 2, 263–272.
- Florsheim J. L., Mount J. F., Chin A., 2008, “Bank erosion as a desirable attribute of rivers,” *Bioscience*, 58, 6, 519–529.
- Fonstad M. A., Marcus W. A., 2005, “Remote sensing of stream depths with hydraulically assisted bathymetry (HAB) models,” *Geomorphology*, 72, 1-4, 320–339.
- Forman R. T. T., Gordon M., 1986, *Landscape ecology*. New-York, John Wiley & Sons, Ltd, 620 p.
- Frey D. G., 1975, “Biological integrity of water - an historical approach,” 127–139 in: *Integrity of water*. Washington, R. K. Ballentine and L. J. Guarraia.
- Frissell C. A., Liss W. J., Warren C. E., Hurley M. D., 1986, “A Hierarchical Framework for Stream Habitat Classification - Viewing Streams in a Watershed Context,” *Environmental Management*, 10, 2, 199–214.
- Fritsch A. J., 1872, “Die Wirbeltiere Böhmens. Ein Verzeichnis aller bisher in Böhmen beobachteten Säugetiere, Vögel, Amphibien und Fische,” *Arch. Naturwissensch Landes durch forsch Böhmen*, 2, 1–152.
- Le Fur A., 2007, *Pratiques de la cartographie*. Paris, Armand Colin, 127 p.
- Gauch H. G., 1982, *Multivariate Analysis in Community Ecology*. Cambridge, Cambridge University Press, 320 p.
- Geerling W., Kater E., Brink C. V. den, Baptist M. J., Ragas A. M. J., Smits A. M. J., 2008, “Nature rehabilitation by floodplain excavation: The hydraulic effect of 16 years of sedimentation and vegetation succession along the Waal River, NL,” *Geomorphology*, 99, 1-4, 317–328.
- Germaine M-A., Puissant A., Lespez L., Ballouche A., 2007, “Analyse spatiale et typologie morphologique des petites vallées bas-normandes,” *Revue internationale de géomatique*, 17, 3-4, 415–430.
- Germaine Marie-Anne., 2008, “Évaluer la diversité des paysages de vallées. Réalisation d’une typologie en Basse-Normandie,” *Norois*, 207, 7–19.
- Gilvear D. J., Bryant R., 2003, “Analysis of Aerial Photography and Other Remotely Sensed Data,” in: M. G. Kondolf & H. Piégay (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Gilvear David J., Waters T. M., Milner A. M., 1995, “Image analysis of aerial photography to quantify changes in channel morphology and instream habitat following placer mining in interior Alaska,” *Freshwater Biology*, 34, 2, 389–398.
- Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P., Valentin S., 1998, *EVHA version 2.0. Evaluation de l’habitat physique des poissons en rivière. Guide méthodologique*. Paris, Cemagref Lyon BEA/LHQ et Ministère de l’aménagement du Territoire et de l’Environnement, Direction de l’Eau, 130 p.
- Ginot Vincent., 1998, *EVHA version 2.0. Evaluation de l’habitat physique des poissons en rivière. Guide de l’utilisateur*. Paris, Cemagref Lyon BEA/LHQ et Ministère de l’aménagement du Territoire et de l’Environnement, Direction de l’Eau, 108 p.
- Girard M. C., Girard C. M., 2004, *Traitement des données de télédétection*. Paris, Dunod, 529 p.
- Girard V., 2007, *Détermination de paramètres hydrauliques par la méthode des hémisphères Fließwasserstammtisch (FST)*. Rapport bibliographique. EMAAP, FONAG, IRD, 18 p.
- Girard V., 2008, *AndeSim. Modélisation des habitats hydrauliques favorables aux invertébrés benthiques des rivières andines d’Equateur. Méthodologie*. Montpellier, Mémoire. Polytech’ Montpellier, 22 p.
- Girel J., 1986, “Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale: exemple de la basse plaine de l’Ain,” 45–74 in: *Documents de Cartographie Écologique*. Recherches interdisciplinaires sur les écosystèmes de la Basse plaine de l’Ain (France). Grenoble, Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble.
- Glova G. J., Duncan M. J., 1985, “Potential effects of reduced flows on fish habitats in a large braided river, New Zealand,” *Transactions of the American Fisheries Society*, 114, 2, 165–181.
- Gore J. A., Nestler J. M., 1988, “Instream flow studies in perspective,” *Regulated Rivers: Research and Management*, 2, 2, 93–101.

- Gorman O. T., Karr J. R., 1978, "Habitat Structure and Stream Fish Communities," *Ecology*, 59, 3, 507–515.
- Grandgirard V., 1997, *Géomorphologie, protection de la nature et gestion du paysage*. Fribourg, Thèse de doctorat. Université de Fribourg, Faculté des sciences, 210 p .
- Gregory S., Hulse D., Bertrand M., Oetter D., 2012, "The Role of Remotely Sensed Data in Future Scenario Analyses at a Regional Scale," 271–297 in: *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Grivel S., 2008, *La Loire des îles, du bec d'Allier à Gien: rythme d'évolution et enjeux de gestion*. Paris, Thèse de doctorat. Université Paris VIII, 515 p .
- Grosprêtre L., 2011, *Etude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Yzeron dans l'Ouest lyonnais*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon II, 297 p .
- Grossmann A., Torresani B., 1998, "Ondelettes," *Encyclopaedia Universalis*. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/ondelettes/#sujet>
- Gupta A., Liew S. C., 2007, "The Mekong from satellite imagery: A quick look at a large river," *Geomorphology*, 85, 3–4, 259–274.
- Gurnell A. M., 1997, "Adjustments in river channel geometry associated with hydraulic discontinuities across the fluvial-tidal transition of a regulated river," *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 10, 967–985.
- Gustard A., 1992, "Analysis of river regimes," 29–47 in: *The rivers handbook. Hydrological and Ecological Principles*. Blackwell Scientific Publications. Oxford, Blackwell Scientific.
- Hall J. E., Halzer D. M., Beechie T. J., 2007, "Predicting river floodplain and lateral channel migration for salmon habitat conservation," *Journal of the American Water Resources Association*, 43, 3, 786–797.
- Haralick R. M., 1979, "Statistical and structural approaches to texture," *IEEE Transactions*, 67, 5, 786–804.
- Hawkes C. L., Miller D. L., Layher W. G., 1986, "Fish ecoregions of Kansas: stream fish assemblage patterns and associated environmental correlates," *Environmental Biology of Fishes*, 17, 4, 267–279.
- Hawkins C. P., Kershner J. L., Bisson P., Bryant M., Decker L., Gregory S. V., et al., 1993, "A hierarchical approach to classifying stream habitat features," *Fisheries*, 18, 6, 3–12.
- Howard A. D., Hemberger A. T., 1991, "Multivariate characterization of meandering," *Geomorphology*, 4, 3-4, 161–186.
- Huet M., 1949, "Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes," *Revue suisse d'hydrologie*, 11, 3-4, 332–351.
- Husson F., Lê S., Pagès J., 2009, *Analyse de données avec R*. Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 224 p .
- Igouzal M., Maslouhi A., Schelstraete D., Chan J., 2003, "Reconstitution de la morphologie d'une rivière à méandres par l'utilisation de la photogrammétrie numérique: Exemple du Sebou, Maroc," *Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 171, 3, 16–21.
- Illies J., Botosaneanu L., 1963, *Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique*. Stuttgart, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 57 p .
- Journal officiel, 1964, "Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution,"
- Journal officiel, 1992, "Loi n° 92-3 du 03/01/92 sur l'eau,"
- Journal officiel, 2006, "Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques,"
- Jowett I. G., 1989, *RHYHABSIM River Hydraulic and Habitat Simulation: A Computer Manual*. Christchurch, New Zealand, New Zealand Fisheries Miscellaneous Report 49, Ministry of Agriculture and Fisheries, 29 p.
- Jowett I. G., 1996, *Instream Flow Methods and Minimum Flow Requirements*. Hamilton, New Zealand, National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), 44 p.
- Jowett I. G., 1998, *River hydraulics and habitat simulation, RHYHABSIM computer manual, second edition*. Hamilton, New Zealand, National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA).
- Jowett I. G., 1993, "A method of objectively identifying pool, run and riffle habitats from physical measurements," *New Zealand Journal of Marine and Fisheries Research*, 27, 2, 241–248.
- Junk W. J., Bayley Peter B., Sparks R. E., 1989, "The flood pulse concept in river floodplain

- systems,” *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, 106, 110–127.
- Junk W. J., Wantzen K. M., 2004, “The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications-an update,” 117–149 in: *Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*. Bangkok, Food and Agriculture Organization and Mekong River Commission, FAO Regional Office for Asia and the Pacific.
- Juramy S., Monfort I., 1987, *L'Evolution des lits fluviaux: l'exemple d'une rivière aménagée, la Durance*. Aix-en-Provence, Thèse de doctorat. Université de Provence, 576 p .
- Karsenty A., 2005, “Classification orientée objet de la perméabilité des sols en zone urbaine à l'aide d'imagerie très haute résolution et de données laser scanner à Curitiba (Brésil).,” *XYZ*, 102, 44–48.
- Kaufman L., Rousseeuw P. J., 1990, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. New York, John Wiley & Sons, Ltd, 368 p .
- Kemp J. L., Harper D. M., Crosa G. A., 1999, “Use of ‘functional habitats’ to link ecology with morphology and hydrology in river rehabilitation,” *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 9, 1, 159–178.
- Kershner J. L., Snider W. M., 1992, “Importance of a habitat-level classification system to design instream flow studies,” 179–193 in: *River Conservation and Management*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Knighton D., 1984, *Fluvial forms and processes*. London ; Baltimore, Md., U.S.A, E. Arnold, 218 p .
- Kondolf G. M., Montgomery David R., Piégay Hervé, Schmitt Laurent, 2003, “Geomorphic Classification of Rivers and Streams,” 171–204 in: G. M. Kondolf & Hervé Piégay (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd.
- Kosuth P., Tormos T., Cernesson F., Lalande Nathalie, Villeneuve B., 2010, “Assessing the role of riparian vegetation and land use on river ecological status, using remote sensing and spatial modelling,” 1–4 in: *Proceedings 7th European Conference on Ecological Restoration*. Avignon.
- Kreis N., 2004, *Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation. Application à la vallée de la Thur (Haut-Rhin)*. Strasbourg, Mémoire. ENGEES, 350 p .
- Labonne J., 2002, *Contribution à la Conservation de l'Apron du Rhône (Zingel asper): Dynamique des Populations, Sélection de l'Habitat et Modélisation*. Villeurbanne, Thèse de doctorat. Claude Bernard Lyon I, 146 p . <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001846/>
- Lalande N., En cours, *Apport de la spatialisation à l'estimation de l'impact des stratégies de restauration des corridors rivulaires sur l'état écologique de milieux aquatiques – cas du bassin de la Saône*. Thèse de doctorat. AGROPARISTECH.
- Lamouroux N., 1997, *Hydraulique statistique et prédiction de caractéristiques du peuplement piscicole: modèles pour l'écosystème fluvial*. Villeurbanne, Thèse de doctorat. Claude Bernard Lyon I, 238 p .
- Lamouroux N., Olivier J. M., Persat H., Pouilly M. C., Souchon Y. S., Statzner B., 1999b, “Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics,” *Freshwater Biology*, 42, 2, 275–299.
- Lamouroux N., Pella H., Vanderbecq A., Sauquet E., Lejot J., 2010, *Estimkart 2.0 : Une plate-forme de modèles écohydrologiques pour contribuer à la gestion des cours d'eau à l'échelle des bassins français. Version provisoire*. Cemagref – Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse – Onema, 45 p.
- Lamouroux Nicolas., 2002, *Estimhab: estimating instream habitat quality changes associated with hydraulic river management*. Cemagref, Onema, 21 p.
- Lamouroux Nicolas, Capra Herve, Pouilly M., Souchon Yves., 1999a, “Fish habitat preferences in large streams of southern France,” *Freshwater Biology*, 42, 4, 673–687.
- Landon N., Piégay H., Bravard J. P., 1998, “The Drome river incision (France): from assessment to management,” *Landscape and Urban Planning*, 43, 1-3, 119–131.
- Lane E. W., 1955, “The importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering,” *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81, 745, 1–17.
- LAWA., 1998, *Gewässerstrukturgüte in der Bundesrepublik Deutschland, Verfahren für kleine und mittlere Fließgewässer, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser*. 180 p.
- Lebart L., Morineau A., Piron M., 1995, *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Paris, Dunod, 440 p .
- Lejot J., 2008, *Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-*

- Rhône (Chantagne). Lyon, Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon II, 257 p.
- Lejot J., Delacourt C., Piégay H., Fournier T., Trémelo M. L., Allemand P., 2007, "Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform," *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 11, 1705–1725.
- Lejot J., Piégay H., 2008, *L'imagerie à très Haute résolution : introduction aux techniques et exemples d'utilisation pour l'étude des cours d'eau*. Agence de l'Eau – Basse vallée de l'Ain – ZABR – CNR, 17 p.
- LeLay Y. F., Piégay H., Cossin M., 2005, "Les enquêtes de perception paysagère à l'aide de photographies. Choix méthodologiques et exemples en milieu fluvial," 1–15 in: *Septièmes Rencontres de Théo Quant*. Besançon.
- Leopold L. B., Maddock T., 1953, *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. USGS Professional Paper 252, 64 p.
- Leopold L. B., Wolman M. G., 1957, *River channel patterns - braided, meandering and straight*. Washington, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 282B, 39-85.
- Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J. P., 1964, *Fluvial processes in Geomorphology*. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 522 p.
- Lévêque C., 1995, "L'habitat : être au bon endroit au bon moment?," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337-338-339, 9–20.
- Leviandier T., Alber A., Le Ber F., Piégay H., 2012, "Comparison of statistical algorithms for detecting homogeneous river reaches along a longitudinal continuum," *Geomorphology*, 138, 1, 130–144.
- Liébault F., 2003, *Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies)*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon II, 358 p.
- Llorens P., Queralt I., Plama F., Gallart F., 1997, "Studying solute and particulate sediment transfer in a small Mediterranean mountainous catchment subject to land abandonment," *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 11, 1027–1035.
- Lorang M. S., Whited D. C., Hauer F. R., Kimball J. S., Stanford J. A., 2005, "Using airborne multispectral imagery to evaluate geomorphic work across floodplains of gravel-bed rivers," *Ecological Applications*, 15, 4, 1209–1222.
- Lotspeich F. B., Platts W. S., 1982, "An Integrated Land-Aquatic Classification System," *North American Journal of Fisheries Management*, 2, 2, 138–149.
- Maddock I. P., Bickerton M. A., Spence R., Pickering T., 2001, "Reallocation of compensation releases to restore river flows and improve instream habitat availability in the Upper Derwent Catchment, Derbyshire, UK," *Regulated Rivers : Research and Management*, 17, 4-5, 417–441.
- Magne M., Gadiolet P., Fagot P., Bravard Jean-Paul, 1989, "Etude de dendrochronologie dans le lit majeur de l'Ain : la forêt alluviale comme descripteur d'une 'métamorphose fluviale'," *Revue de Géographie de Lyon*, 64, 4, 213–223.
- Malavoi J. R., 1989, "Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 315, 189–210.
- Malavoi J. R., Bravard J. P., 2010, *Elements d'hydromorphologie fluviale*. Onema, 224 p.
- Malavoi J. R., Souchon Y., 2002, "Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365/366, 357–372.
- Malavoi J.-R., 2009, "La restauration hydromorphologique des cours d'eau," 21 in: *Journée technique - RRGMA*. Goult (Vaucluse).
- Malavoi J.-R., AREA., 2000, *Typologie et sectorisation des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne*. Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 79 p.
- Marcus W. A., Crabtree R. L., Aspinall R., Boardman J. W., Despain D., Minshall G. W., 2001, *Validation of High-Resolution Hyperspectral Data for Stream and Riparian Habitat Analysis*. Stennis Space Flight Center, Louisiana: MS., Annual Report (Phase 2) to NASA EOCAP Program, Stennis Space Flight Center, Mississippi, 127 p.
- Marcus W. A., Legleiter C. J., Aspinall R. J., Boardman J. W., Crabtree R. L., 2003, "High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams," *Geomorphology*, 55, 1-4, 363–380.
- Marston R. A., Girel J., Pautou G., Piégay H., Bravard J. P., Arneson C., 1995, "Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development - Ain river, France," *Geomorphology*, 13, 1-4, 121–131.

- Meyer Y., Jaffard S., Rioul O., 1987, "L'analyse par ondelettes." *Pour la Science*, 119, 28–37.
- Milhous R. T., 1979, "The PHABSIM system for instream flow studies," 440–446 in: *Proceedings: 1979 Summer Computer Simulation Conference*. Toronto, Ontario, La Jolla, CA: The Society for Computer Simulation.
- Minvielle E., Souiah S., 2003, *L'analyse statistique et spatiale: statistiques, cartographie, télédétection, SIG*. Nantes, Editions du Temps, 284 p .
- Miramont C., 1998, *Morphogénèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance*. Aix-en-Provence, Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille I, 286 p .
- Moir H. J., Pasternack G. B., 2008, "Relationships between mesoscale morphological units, stream hydraulics and Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) spawning habitat on the Lower Yuba River, California," *Geomorphology*, 100, 3-4, 527–548.
- Montgomery D. R., Buffington J. M., 1997, "Channel reach morphology in mountain drainage basins," *Geological Society of America Bulletin*, 109, 5, 596–611.
- Mosley M. P., 1982, *A procedure for characterising river channels*. Wellington, Water & soil miscellaneous publication, 67 p .
- Mosley M. P., Jowett I. G., 1985, "Fish habitat analysis using river flow simulation," *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 19, 3, 293–309.
- Naiman R. J., Décamps H., 1997, "The ecology of interfaces: Riparian zones," *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 621–658.
- Newbury R., Gaboury M. N., Corporation M. H. H., Branch M. F., 1993, *Stream analysis and fish habitat design: a field manual*. Winnipeg, Newbury Hydraulics, Limited, 280 p .
- Newson M. D., Clark M. J., Sear D. A., Brookes A., 1998, "The geomorphological basis for classifying rivers," *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 8, 4, 415–430.
- Newson M. D., Newson C. L., 2000, "Geomorphology, ecology and river channel habitat: mesoscale approaches to basin-scale challenges," *Progress in Physical Geography*, 24, 2, 195–217.
- Nilsson C., Grelsson G., Johansson M., Sperens U., 1989, "Patterns of Plant Species Richness Along Riverbanks," *Ecology*, 70, 1, 77–84.
- O'Neill M. P., Abrahams A. D., 1984, "Objective identification of pools and riffles," *Water Resources Research*, 20, 7, 921–926.
- O'Neill R. V., Deangelis D. L., Waide J. B., Allen G. E., 1986, *A Hierarchical Concept of Ecosystems*. Princeton, Princeton University Press, 253 p .
- Odum E. P., 1959, *Fundamentals of Ecology*. W. B. Saunders, 546 p .
- Ollero A., Askoa I., Gonzalo L. E., Acin V., Ballarin D., Diaz E., et al., 2011, "The IHG index for hydromorphological quality assessment of rivers and streams: updated version," *Limnetica*, 30, 2, 255–262.
- Omernik J. M., 1987, "Ecoregions of the conterminous United States. Map (scale 1:7,500,00)," *Annals of The Association of American Geographers*, 77, 1, 118–125.
- Orth D. J., Maughan O. E., 1983, "Microhabitat preferences of benthic fauna in a woodland stream," *Hydrobiologia*, 106, 2, 157–168.
- Padmore C. L., 1997, *Physical biotopes in representative river channels: identification, hydraulic characterisation and application*. Newcastle, Thèse de doctorat. Université de Newcastle, 280 p . <https://theses.ncl.ac.uk/dspace/handle/10443/313>
- Padmore C. L., Newson M. D., Charlton M. E., 1998, "Instream habitat in gravel bed rivers: identification and characterisation of biotopes," 345–364 in: *Gravel Bed Rivers in the Environment*. Highlands Ranch, CO, Water Resources Publications.
- Paegelow M., 2004, *Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective*. Toulouse, Habilitation à diriger des recherches. Université de Toulouse Le Mirail, 211 p .
- Paetzold A., Schubert C., Tockner K., 2005, "Aquatic-terrestrial linkages along a braided river: Riparian arthropods feeding on aquatic insects," *Ecosystems*, 8, 748–759.
- Panizza M., 2001, "Géomorphosites: Concepts, methods and examples of geomorphological survey," *Chinese Science Bulletin*, 46, 4–6.
- Panizza M., Piacente S., 1993, "Geomorphological assets evaluation," *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl. Bd*, 87, 13–18.
- Panizza M., Piacente S., 2003, *Geomorfologia culturale*. Bologna, Pitagora Editrice, 350 p .
- Panizza V., Mennella M., 2007, "Assessing geomorphosites used for rock climbing. The

- example of Monteleone Rocca Doria (Sardinia, Italy).” *Geographica Helvetica*, 62, 181–191.
- Parasiewicz P., 2007a, “The MesoHABSIM model revisited,” *River Research and Applications*, 23, 8, 893–903.
- Parasiewicz P., 2007b, “Using MesoHABSIM to develop reference habitat template and ecological management scenarios,” *River Research and Applications*, 23, 8, 924–932.
- Parasiewicz P., 2001, “MesoHABSIM: A concept for application of instream flow models in river restoration planning,” *Fisheries*, 26, 9, 6–13.
- Parasiewicz P., 2003, “Upscaling: Integrating habitat model into river management,” *Canadian Water Resources Journal*, 28, 2, 283–299.
- Parrot E., Piégay Hervé, Tal M., 2012, *Analyse de l'évolution géométrique du chenal de Genève à la mer. Action 1. Rapport d'avancement S5*. Observatoire des Sédiments du Rhône.
- Passmore D. G., Macklin M. G., 1994, “Provenance of fine-grained alluvium and late Holocene land-use change in the Tyne Basin, northern England,” *Geomorphology*, 9, 2, 127–142.
- Pella H., Lejot J., Lamouroux N., Snelder T., 2012, “Un réseau hydrographique théorique français détaillé et ses attributs environnementaux : le RHT,” *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, 317–336.
- Pella H., Snelder T., Lamouroux N., Vanderbecq A., Shankar U., Rogers C., 2008, “Réseau hydrographique naturel étendu (RHE) construit à partir de la BD Carthage,” *Ingénieries - E A T*, 55-56, 15–28.
- Pereira P., Pereira D., Alver M. I. C., 2007, “Geomorphosite assessment in Montesinho Natural Park (Portugal),” *Geographica Helvetica*, 62, 159–168.
- Perez Correa M., 2004, *Développement d'une méthode de cartographie de l'occupation du sol le long des cours d'eau à partir de données de télédétection*. Mémoire. ENGREF, 44 p .
- Pettitt A. N., 1979, “A non-parametric approach to the Change-point Problem,” *Applied Statistics*, 28, 2, 126–135.
- Petts G. E., Amoros C., 1996, *Fluvial hydrosystems*. London, Chapman & Hall, 322 p .
- Le Pichon C., 2006, *Une approche “paysage aquatique” pour une meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes fluviaux et l'amélioration de la conservation des peuplements de poissons*. Paris, Thèse de doctorat. Univ. Paris VI, 180 p .
- Le Pichon C., Gorges G., Boët P., Baudry J., Goreaud F., Faure T., 2006, “A Spatially Explicit Resource-Based Approach for Managing Stream Fishes in Riverscapes,” *Environmental Management*, 37, 3, 322–335.
- Piégay H., 1995, *Dynamiques et gestion de la Ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône*. Paris, Thèse de doctorat. Université Paris IV - Sorbonne, 529 p .
- Piégay H., 1997, “Principes nouveaux en matière de gestion des marges de rivières en tresses : exemple de la moyenne vallée du Giffre, Haute-Savoie, France,” *Revue de géographie alpine*, 85, 2, 33–48.
- Piégay H., Alber A., Lauer J. W., Rollet A.-J., Wiederkehr E., 2012, “Biophysical Characterisation of Fluvial Corridors at Reach to Network Scales,” 241–270 in: *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd.
- Piégay H., Alber A., Slater L., Bourdin L., 2009, “Census and typology of braided rivers in the French Alps,” *Aquatic Sciences*, 71, 3, 371–388.
- Piégay H., Darby S. A., Mosselmann E., Surian N., 2005b, “The erodible corridor concept: applicability and limitations for river management,” *River Research and Applications*, 21, 773–789.
- Piégay H., Gregory K. J., Bondarev V., Chin A., Dahlstrom N., Elozegi A., et al., 2005a, “Public Perception as a Barrier to Introducing Wood in Rivers for Restoration Purposes,” *Environmental Management*, 36, 5, 665.
- Piégay H., Landon N., Saulnier D., 2000, *Etude géomorphologique de la basse rivière d'Ain*. Commission locale de l'eau du SAGE Basse vallée de l'Ain, 82 p. + Atlas.
- Poff N. L., 1997, “Landscape Filters and Species Traits: Towards Mechanistic Understanding and Prediction in Stream Ecology,” *Journal of the North American Benthological Society*, 16, 2, 391.
- Pont D., Roditis J.-C., 1993, “Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta,” *Méditerranée*, 78, 3, 5–18.
- Porcher J. P., 2009, “Le cadre proposé par la Directive Cadre Européenne sur l'eau : outils de mesure et évaluation de l'état des eaux,” *La Houille Blanche*, 3, 41–45.
- Pornon H., 2011, *SIG la dimension géographique du système d'information*. Paris, Dunod, 296 p .

- Puestow T. M., Simms E. L., Simms A., Butler K., 2001, "Mapping of salmon habitat parameters using airborne imagery and digital ancillary data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 3, 309–317.
- Puissant A., 2003, *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*. Strasbourg, Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur, 349 p .
- Pumain D., Saint-Julien T., 2010, *Analyse spatiale : les localisations*. Paris, Armand Colin, 192 p .
- Quinquis A., 2007, *Le traitement du signal sous Matlab : pratique et applications*. Paris, Hermès science publications, 446 p .
- Raso T., 2011, *Mise en place d'une méthodologie d'étude diachronique des méso-habitats piscicoles à partir de photographies aériennes et d'images satellitaires*. Strasbourg, Mémoire. ENGEES - Université Louis Pasteur, 75 p .
- Raven P. J., Fox P., Everard M., Holmes N. T. H., Dawson F. H., 1997, "River Habitat Survey: a new system for classifying rivers according to their habitat quality," 215–234 in: P. J. Boon & D. L. Howell (Eds.), *Freshwater quality : defining the indefinable?* Edinburgh, The Stationery Office.
- Reinfelds I., Cohen T. J., Batten P., Brierley G., 2004, "Assessment of downstream trends in channel gradient, total and specific stream power: a GIS approach," *Geomorphology*, 60, 3-4, 403–416.
- Renard B., 2006, *Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*. Grenoble, Thèse de doctorat. INP Grenoble, 361 p .
- Reynard E., 2004, "Geosites," *Encyclopedia of Geomorphology*, 440.
- Reynard E., 2005, "Paysage et géomorphologie : quelques réflexions sur leurs relations réciproques," 101–124 in: *La polyphonie du paysage*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Reynard E., Fontana G., Kozlik L., Scapozza C., 2007, "A method for assessing 'scientific' and 'additional values' of géomorphosites," *Geographica Helvetica*, 62, 148–158.
- Richards C., Haro R., Johnson L., Host G., 1997, "Catchment and reach-scale properties as indicators of macroinvertebrate species traits," *Freshwater Biology*, 37, 1, 219–230.
- Ridenour G. S., Giardino J., 1995, "Discriminant function analysis of computational data: an example from hydraulic geometry," *Physical Geography*, 15, 481–492.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2011, "The morphological quality index (MQI) for stream evaluation and hydromorphological classification," *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1.
- Rioul O., 2005, "Analyse temps- fréquence et temps-échelle,"
- Robin M., 1995, *La télédétection*. Paris, Nathan, 318 p .
- Roché J., 1986, *Les oiseaux nicheurs des cours d'eau du bassin de la Saône: étude écologique des peuplements le long du gradient amont-aval*. Dijon, Université de Bourgogne, 187 p .
- Roche P. A., Billen G., Bravard J. P., Decamps H., Pennequin D., Vindimian E., et al., 2005, "Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau," *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 1-2, 243–267.
- Rollet A-J., 2007, *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Lyon, Thèse de doctorat. Université Jean Moulin - Lyon III, 305 p .
- Rosgen D., 1996, *Applied River Morphology*. Pagosa Springs, Colorado, Wildland Hydrology Books, 390 p .
- Roux A. L., 1982, *Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux ; étude d'un hydrosystème fluvial : le Haut-Rhône français*. Editions CNRS, Centre, Lyon, 116 p .
- Sauquet E., 2000, *Une cartographie des écoulements annuels et mensuels d'un grand bassin versant structurée par la topologie du réseau hydrographique*. Grenoble, Thèse de doctorat. INP Grenoble, 356 p .
- Schmitt L., 2001, *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*. Strasbourg, Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur, 323 p .
- 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, 347–363.
- Schmitt L., Maire G., Nobelis P., Humbert J., 2007, "Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the French Upper Rhine basin," *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 11, 1726–1746.

- Schmitt L., Valette L., Valin K., Piégay H., Hallot E., 2004, "Proposition d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau et test sur un sous-bassin du Rhône (bassin de l'Yzeron)," *Mosella*, Tome XXIX, 3-4, 323–340.
- Schumm S. A., 1977, *The fluvial system*. New-York, Wiley-Interscience, 338 p .
- Schumm S. A., 1985, "Patterns of alluvial rivers," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, 5–27.
- Servigne S., Libourel T., 2006, *Fondements des bases de données spatiales*. Paris, Hermes Science : Lavoisier, 236 p .
- Skupinski G., BinhTran D., Weber C., 2009, "Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France)," *Cybergeo: European Journal of Geography*, 439. <http://cybergeo.revues.org/21995>
- Sneath P. H. A., Sokal R. R., 1973, *Numerical taxonomy: the principles and practice of numerical classification*. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 573 p .
- Souchon Y., 2002, *L'habitat des cours d'eau dans tous ses états*. Lyon, Habilitation à diriger des recherches. Université Claude Bernard Lyon I, 117 p .
- Souchon Y., Andriamahefa H., Breil P., Albert M. B., Capra H., Lamouroux N., 2002, "Vers de nouveaux outils pour l'aide à la gestion des hydrosystèmes: couplage des recherches physiques et biologiques sur les cours d'eau," *Natures sciences sociétés*, 10, 26–41.
- Souchon Y., Andriamahéfa H., Cohen P., Breil P., Pella H., Lamouroux N., et al., 2000, *Régionalisation de l'habitat aquatique dans le bassin de la Loire*. Synthèse. Agence de l'eau Loire Bretagne, Cemagref Bely/LHQ, 297 p .
- Souchon Y., Trocherie F., Fragnoud E., Lacombe C., 1989, "Les modèles numériques des microhabitats des poissons: application et nouveaux développements," *Revue des sciences de l'eau*, 2, 4, 807–830.
- Stalnaker C.B., 1979, "The use of habitat structure preference for establishing flow regimes necessary for maintenance of fish habitat," 326–337 in: *The ecology of regulated streams*. New York, Ward J.V. et Stanford J.A.
- Statzner B., Higl B., 1986, "Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns," *Freshwater Biology*, 16, 1, 127–139.
- Takagi T., Oguchi T., Matsumoto J., Grossman M. J., Sarker M. H., Martin M. A., 2007, "Channel braiding and stability of the Brahmaputra River, Bangladesh, since 1967: GIS and remote sensing analyses," *Geomorphology*, 85, 3-4, 294–305.
- Thienemann A., 1925, *Die Binnengewässer Mitteleuropas: eine limnologische Einführung*. Stuttgart, E. Schweizerbart, 255 p .
- Thiessen A. H., 1911, "Precipitation averages for large areas," *Monthly Weather Review*, 39, 7, 1082–1084.
- Thomas A., 2005, *Application de l'approche orientée-objet à l'extraction de fragments forestiers à partir de scènes Spot*. Toulouse, Mémoire. Université le Mirail, 30 p .
- Thompson J. R., Taylor M. P., Fryirs K. A., Bierley G. J., 2001, "A geomorphological framework for river characterization and habitat assessment," *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 11, 5, 373–389.
- Thorp J. H., Thoms M. C., Delong M. D., 2008, *The riverine ecosystem synthesis: toward conceptual cohesiveness in river science*. Amsterdam; Boston, Elsevier, 232 p .
- Tockner K., Malard F., Ward J. V., others., 2000, "An extension of the flood pulse concept," *Hydrological processes*, 14, 16-17, 2861–2883.
- Toone J., Rice S. P., Piégay H., 2012, "Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river, upper Drôme River, southeast France: Contingent responses to external and internal controls," *Geomorphology*.
- Tormos T., 2010, *Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau*. Thèse de doctorat. AgroParisTech, 426 p .
- Tormos T., Kosuth P., Durrieu S., Villeneuve B., Wasson J. G., 2011, "Improving the quantification of land cover pressure on stream ecological status at the riparian scale using High Spatial Resolution Imagery," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36, 12, 549–559.
- Turner M. G., Gardner R. H., O'Neill R. V., 2001, *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. New York, Springer, 420 p .
- Union européenne., 2000, "Directive 2000-60-CE du parlement européen et du conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau."

- Valette L., Chandesris A., Malavoi J. R., Souchon Y., Willet B., 2010, *Protocole AURAH-CE Audit RAPide de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Méthode de recueil d'informations complémentaires à SYRAH-CE sur le terrain*. ONEMA - Cemagref, 35 p.
- 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*. Cemagref, Onema, 28 p.
- Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R., Cushing C. E., 1980, "The river continuum concept," *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, 37, 1, 130–137.
- Vanpeene-Bruhier S., 2003, "Evaluation des risques environnementaux pour la gestion durable des espaces : synthèse des concepts de l'écologie du paysage," 9–19 in: *Actes des journées 2003 de l'Association Internationale pour l'Écologie du Paysage LALE France*. Gap, France.
- Verneaux J., 1973, *Cours d'eau de Franche-Comté (Massif du Jura). Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs. Essai de biotypologie*. Besançon, Thèse de doctorat. Université de Besançon, 257 p.
- Veza P., 2010, *Regional meso-scale habitat models for environmental flows assessment*. Turin, Thèse de doctorat. Polytechnic University of Turin, 92 p.
- Waddle T. J., 2012, *PHABSIM for Windows user's manual and exercises*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2001-340, 288 p.
- Wadson R. A., 1994, "A Geomorphological approach to the identification and classification of instream flow environments," *South African Journal of Aquatic Sciences*, 20, 1/2, 38–61.
- Walford N., 2011, *Practical statistics for geographers and earth scientists*. Chichester, West Sussex, UK ; Hoboken, NJ, Wiley-Blackwell, 416 p.
- Ward J. V., 1989, "The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems," *Journal of the North American Benthological Society*, 8, 1, 2.
- Ward J. V., 1998, "Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation," *Biological Conservation*, 83, 3, 269–278.
- Ward J. V., Tockner K., Arscott D. B., Claret C., 2002, "Riverine landscape diversity," *Freshwater Biology*, 47, 517–539.
- Ward J. V., Tockner K., Schiemer F., 1999, "Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity," *Regulated Rivers: Research and Management*, 15, 1-3, 125–139.
- Ward J. V., Tockner K., Uehlinger U., Malard F., 2001, "Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration," *Regulated Rivers: Research and Management*, 17, 4-5, 311.
- Ward J. V., Uehlinger U., 2003, *Ecology of a Glacial Flood Plain*. New York, Springer, 336 p.
- Warren C. E., 1979, *Toward classification and rationale for watershed management and stream protection*. Corvallis, Oregon, USA, Environ Protect. Agency, Report n°600 / 3-79-059, 143 p.
- Wasson J. G., 1989, "Éléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes. 1. Revue critique de quelques approches existantes," *Bull. Ecol.*, 20, 2, 109–127.
- Wasson J. G., 2001, "Les questions de recherche posées par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau: problématique pour les eaux de surface continentales," *Hydroécologie Appliquée*, 13, 1, 1–19.
- Wasson J. G., Bethemont J., Degorge J. N., Dupuis B., Joliveau T., 1993, *Approche écosystémique du bassin de la Loire: éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase 1: Etat initial - Problématique*. Cemagref Lyon BEA/LHQ et Univ. St Etienne CRENAM, Rapport final 102 p. + Atlas, 70 p. et Annexes.
- Wasson J. G., Chandesris A., Pella H., Blanc L., 2004, "Les hydro-écorégions: une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau," *Ingénieries*, 40, 3–10.
- Wasson J.-G., Malavoi J.-R., Maridet L., Souchon Yves, Paulin L., 1998, *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières*. Paris, Cemagref, 162 p.
- Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L., Grandjean P., Soumis, "Spatial and temporal temperature patterns of braided rivers using very high resolution thermal infrared images," *International Journal of Remote Sensing*.
- Wawrzyniak V., Piégay H., Poirel A., 2012, "Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhône River using Landsat ETM+ thermal infrared images," *Aquatic Sciences*, 74, 3, 405–414.
- Westaway R. M., Lane S. N., Hicks D. M., 2000, "The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow gravel-bed rivers," *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 2, 200–226.

- Westaway R. M., Lane S. N., Hicks D. M., 2001, "Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 11, 1271–1282.
- Westaway R. M., Lane S. N., Hicks D. M., 2003, "Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis," *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4, 795–815.
- Whited D., Stanford J. A., Kimball J. S., 2002, "Application of airborne multispectral digital imagery to quantify riverine habitats at different base flows," *River Research and Applications*, 18, 6, 583–594.
- Wiederkehr E., Belletti B., Dufour S., Piégay H., 2010a, "Physical characterisation of river corridors from orthophotos: challenging issues and first application to the Rhône hydrographic network," 1682–1777 in: *Geographic Object-Based Image Analysis. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXVIII-4/C7*. Ghent, Belgium, Addink, E. A. & F. M. B. Van Coillie.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., 2010c, *Intégration de données extraites des ortho-photos de l'IGN pour la caractérisation et la modélisation de l'habitat aquatique*. Lyon, Agence de l'eau RMC-ZABR-CEREGE, 79 p.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., 2010b, "Localisation et caractérisation semi-automatique des géomorphosites fluviaux potentiels. Exemples d'applications à partir d'outils géomatiques dans le bassin de la Drôme (France)," *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2, 175–188.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., 2008, *Action A 6 Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux. Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs*. Lyon, Agence de l'eau RMC-ZABR-CEREGE, 49 p.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., 2009, *Caractérisation du corridor naturel alluvial du réseau hydrographique du bassin du Rhône à partir des orthophotographies de l'IGN. Premiers retours d'expérience pour l'élaboration de modèles hydrogéomorphologiques prédictifs*. Lyon, Agence de l'eau RMC-ZABR-CEREGE, 65 p.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., Bertrand M., 2012, *Indicateurs de caractérisation physique des milieux aquatiques. Premiers rendus cartographiques et premières analyses à l'échelle du réseau hydrographique*. Lyon, Agence de l'eau RMC-ZABR, 77 p. + Atlas, 72 p. + Annexes, 25 p.
- Wiken E. B., 1986, "Ecozones terrestres du Canada," *Série de la classification écologique du territoire*, 26.
- Williams W. A., Jensen M. E., Winne J. C., Redmond R. L., 2000, "An automated technique for delineating and characterizing valley-bottom settings," *Environmental monitoring and assessment*, 64, 1, 105–114.
- Winterbottom S. A., 2000, "Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland," *Geomorphology*, 34, num.3-4, 195–208.
- Winterbottom S. J., Gilvear David J., 1997, "Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography," *Regulated Rivers: Research and Management*, 13, 6, 489–499.
- Wolman M. G., 1955, *The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania*. USGS Professional Paper n°271, 56 p.
- Wong T. H., Mansor S. B., Mispan M. R., Ahmad N., Sulaiman W. N. A., 2003, "Feature extraction based on object oriented analysis," 1–10 in: *Proceedings of ATC 2003 Conference*. Malaysia.
- Woodsmith R. D., Buffington J., 1996, "Multivariate geomorphic analysis of forest streams: implications for assessment of land-use impacts on channel condition," *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 4, 377–394.
- Yang C. T., 1971, "Formation of riffles and pools," *Water Resources Research*, 7, 6, 1567–1574.
- Yu L., Oldfield F., 1993, "Quantitative sediment source ascription using magnetic measurements in a reservoir-catchment system near Nijar, S.E. Spain," *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 5, 441–454.
- Zhang G. B., Ai N. S., Huang Z. W., Yi C. B., Qin F. C., 2008, "Meanders of the Jialing River in China: Morphology and formation," *Chinese Science Bulletin*, 53, 2, 267–281.
- Zouros N., 2007, "Geomorphosite assessment and management in protected areas of Greece. Case study of the Lesvos island - coastal geomorphosites," *Geographica Helvetica*, 62, 168–180.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Table des équations

Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude

Équation 1.1. Équations représentant l'influence des variables externes sur la morphologie du chenal (Knighton, 1984).....22

Partie 3. Étude à l'échelle du tronçon fluvial

Équation 3.1. Équation de Box Cox.156

Équation 3.2. Calcul permettant de centrer-réduire les variables.....157

Équation 3.3. Détermination du taux d'érosion latérale E_{roLat} , de la puissance brute Ω et d'un débit biennal Q_2 ...175

Partie 4. Étude à l'échelle du faciès

Équation 4.1. Modèle logistique.194

Équation 4.2. Modèle d'identification des secteurs en mouilles.195

Équation 4.3. Indice de diversité de Shannon.....206

Table des figures

Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude

Figure 1.1. Concepts clés dans l'étude de plaines alluviales (modifiés d'après (Amoros et Petts, 1993 ; Schumm, 1977 ; Vannote et al., 1980) in (Dufour, 2005)). A : système fluvial – B : hydrosystème fluvial – C : concept de continuum fluvial – D : mosaïque d'écosystèmes.22

Figure 1.2. Mise en correspondance des zonations écologiques et typologiques des cours d'eau (Collectif ONEMA, 2010).24

Figure 1.3. Habitat et morphologie : des échelles emboîtées (Wasson et al., 1998).....28

Figure 1.4. La « balance de Lane » et le principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane (1955) in Malavoi et Bravard (2010)).29

Figure 1.5. Le spectre électromagnétique et son application en télédétection (d'après (Chaponniere, 2004)).47

Figure 1.6. Lien entre la taille du tronçon et le coût (Carbonneau et al., 2012).51

Figure 1.7. Évolution du nombre de publications scientifiques sur la période 1975 – 2010 ayant pour mots-clés A : « Fluvial geomorphology » ; B : « Remote sensing » et « Fluvial geomorphology » et B : « GIS » et « Fluvial geomorphology » (Source : Elsevier, base non exhaustive).....52

Figure 1.8. Illustrations de différents types de *raster* : une orthophotographie de la BD Ortho® (A), une image Spot 5 (B) et un modèle numérique de terrain (C) (Sources : Géoportail : <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>).54

Figure 1.9. Illustration des différents types d'entités vectorielles : le point (A), la ligne (B) et le polygone (C) (Sources : Géoportail et Infoterre).....58

Figure 1.10. Interprétation des graphes en boîtes.60

Figure 1.11. Schéma des axes de recherche développés dans cette thèse.64

Figure 1.12. Représentation des 11 grands bassins hydrographiques français (Sources : Site Rhin-Meuse – <http://www.eau-rhin-meuse.fr/>)65

Figure 1.13. Variabilité des régimes hydrologiques au sein du bassin versant du Rhône.67

Figure 1.14. La Drôme et son bassin versant.70

Figure 1.15. Représentation continue du réseau hydrographique de la BD Topo® du bassin Rhône et Méditerranée (Wiederkehr et al., 2008).72

Figure 1.16. Illustration des différences entre la photographie (A) et la donnée de la BD Topo® (B) (Source : Géoportail version 2).....73

Partie 2. Méthode générale

Figure 2.1. Présentation du nouveau référentiel en fonction de la couche « Hydro » de la BD Carthage® et la couche « Tronçon » de la BD Topo®.....	80
Figure 2.2. Polygones extraits à partir de données de la BD Topo®.....	81
Figure 2.3. Extraction de l'image à l'intérieur de l'objet géographique « fond de vallée ».....	83
Figure 2.4. Différence de radiométrie au sein d'un même objet.....	84
Figure 2.5. Illustration des polygones « eau » et « bancs de galets » (A) permettant la construction de la bande active (B). Identification des îles végétalisées (C) et construction de la bande fluviale (D).....	85
Figure 2.6. Illustration du linéaire (A) et des polygones (B) à intersecter (C). Présentation du linéaire avec les secteurs intitulés « non visible » en rouge (D).....	87
Figure 2.7. Extraction des objets composant la bande fluviale à partir d'une méthode orientée-objet.....	91
Figure 2.8. Illustrations de l'ombre portée (A) et de l'étréitesse du chenal (B).....	92
Figure 2.9. Illustration des unités spatiales primaires.....	93
Figure 2.10. Définition des unités spatiales génériques et l'axe de référence linéaire pour la caractérisation des objets géographiques à l'échelle du réseau (Alber et Piégay, 2011). A : Objets élémentaires – B : Objets Géographiques désagrégés – C : Objets Géographiques réagrégés.....	94
Figure 2.11. Présentation des étapes de construction des objets géographiques désagrégés (DGO).....	95
Figure 2.12. Présentation de la méthode permettant de créer les unités spatiales à partir des données brutes.....	97
Figure 2.13. Exemple de métriques issues de données vectorielles extraites par DGO : calcul de la surface, extraction des coordonnées géographiques extraites par rives, calcul de la largeur, calcul de la longueur.....	99
Figure 2.14. Les six informations accessibles sur un objet (Lejot et Piégay (2008) d'après Robin (1995)).....	100
Figure 2.15. Illustration des métriques issues des données matricielles pouvant être extraites avec ArcGis.....	100
Figure 2.16. La somme de plusieurs ondes sinusoïdales forme une onde totale.....	102
Figure 2.17. Schéma méthodologique général pour caractériser l'état physique des masses d'eau appliqué dans les différents travaux présentés dans le cadre de la thèse.....	108

Partie 3. Étude à l'échelle du tronçon fluvial

Figure 3.1. Schéma méthodologique : identification des sites potentiellement de type « géomorphosites » dans les réseaux hydrographiques.....	121
Figure 3.2. Segmentations de la bande active (A) en fonction de sa largeur, du fond de vallée (B) en fonction de sa largeur, donnant des tronçons géomorphologiques homogènes (C).....	122
Figure 3.3. Schéma méthodologique : construction de tronçons géomorphologiques homogènes sur la Drôme.....	123
Figure 3.4. Localisation des tronçons dont le fond de vallée est significativement étroit.....	125
Figure 3.5. Tronçon géomorphologique homogène identifié comme un site en gorges.....	127
Figure 3.6. Résultat de la classification ascendante hiérarchique réalisée sur 53 tronçons fluviaux caractérisés par quatre métriques géomorphologiques. A : Dendrogramme ordonnant les 53 tronçons et les distributions par classes. B : Indice de confinement. C : Largeur de la bande active. D : Indice de sinuosité. E : Taux surfacique eau / bande active.....	129
Figure 3.7. Classes géomorphologiques déterminées à partir de la classification ascendante hiérarchique.....	130
Figure 3.8. Répartition longitudinale des styles fluviaux le long du cours principal de la Drôme.....	130
Figure 3.9. Cartographie de la densité d'écotones par tronçons homogènes du corridor fluvial de la Drôme. 1 : très faible ; 2 : faible ; 3 : moyenne ; 4 : forte ; 5 : très forte. Méthode : pour chaque tronçon homogène la longueur de contact entre deux écosystèmes est divisée par la longueur du tronçon.....	132
Figure 3.10. Illustration dans le bassin de la Durance des critères utilisés pour la détermination des tronçons géomorphologiques homogènes : identifiants de rivière (A), largeur du fond de vallée (B), largeur de la bande active (C).....	141
Figure 3.11. Illustration de la méthode utilisée pour construire des tronçons géomorphologiques homogènes sur l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien.....	142
Figure 3.12. Schéma méthodologique : création de tronçons géomorphologiques homogènes à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse.....	143
Figure 3.13. Calcul des métriques : à partir d'un polygone, calcul de la surface (B) ; à partir d'une polyligne, calcul de la longueur du tronçon (A) et de la longueur à vol d'oiseau (C).....	147
Figure 3.14. Architecture de la base de données de mesures physiques (BD RMC – Physique).....	149
Figure 3.15. Schéma méthodologique : création d'une base de données de mesures physiques à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse (liste des métriques non exhaustive).....	151
Figure 3.16. Schéma méthodologique : utilisation de la base de données de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse.....	152
Figure 3.17. Exemples de variables avant et après transformation de Box Cox A : histogramme / B : box plot / C : distribution des quantiles.....	156
Figure 3.18. Résultat de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH sans bande active caractérisés par 3 indicateurs géomorphologiques.....	158
Figure 3.19. Résultats de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH avec bande active.....	159

Figure 3.20. Caractérisation des styles fluviaux par les sept métriques utilisées pour déterminer les types morphologiques des tronçons « avec bande active ».....	160
Figure 3.21. Valeurs médianes et moyennes par TGH des indicateurs par classes. A 'num' : tronçons « sans bande active » et B 'num' : tronçons « avec bande active ».....	162
Figure 3.22. Récapitulatif de la typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse.	163
Figure 3.23. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Chenaux composites.....	164
Figure 3.24. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Petits systèmes.....	165
Figure 3.25. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Chenal simple 1.	166
Figure 3.26. Typologie du réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée Corse – Chenal simple 2.	167
Figure 3.27. Localisation des rivières en tresses par une méthode semi-automatique (A) et par analyse experte (Piégay et al. 2009) (B).	168
Figure 3.28. Tronçons Géomorphologiques Homogènes (en rouge) testés.	169
Figure 3.29. Illustration d'un TGH de type B8 : à partir de l'orthophotographie (Géoportail) et représenté de manière vectorielle.	171
Figure 3.30. Localisation des secteurs en tresses présentant un potentiel de diversité des habitats aquatiques fort. ...	173
Figure 3.31. Réseau hydrographique où l'érosion latérale potentielle peut être prédite par SIG à l'heure actuelle. ...	174
Figure 3.32. Taux potentiel d'érosion latérale par TGH prédit (en m/an) à partir de la puissance brute biennale et de la sur largeur de bande active.	176

Partie 4. Étude à l'échelle du faciès

Figure 4.1. Clé de détermination des faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002).	187
Figure 4.2. Illustration des faciès détectés par Moir et Pasternack (2008).	188
Figure 4.3. Localisation de la zone d'étude et présentation des tronçons géomorphologiques homogènes de la partie aval de la Drôme.	191
Figure 4.4. Schéma méthodologique : création d'une carte de présence de mouilles (probabilité) à partir d'une régression logistique.	192
Figure 4.5. Valeur du débit à la station hydrométrique de Saillans (Drôme) (Source : Banque Hydro).....	193
Figure 4.6. Résultats obtenus pour le modèle de régression logistique constitué à partir des polygones intra-chenaux.	195
Figure 4.7. Illustration d'un DGO composé de plusieurs faciès morphologiques.	195
Figure 4.8. Exemple d'un secteur cartographié en fonction de la probabilité de mouille par polygones.	196
Figure 4.9. Schéma méthodologique : caractérisation des méso-habitats à partir d'un modèle statistique de reconnaissance des habitats aquatiques.	198
Figure 4.10. Exemples des méso-habitats identifiables sur la Drôme.	199
Figure 4.11. Illustration d'un seuil (Malavoi, 1989).	199
Figure 4.12. Illustration d'un plat (Malavoi, 1989).	200
Figure 4.13. Illustration d'une mouille et d'un banc de convexité (Malavoi, 1989).	200
Figure 4.14. Exemple d'une métrique qui discrimine clairement les habitats (moyenne dans le canal rouge) (A) et une métrique sans discrimination entre les différents habitats (log standard deviation dans le canal rouge) (B).	202
Figure 4.15. Graphique de l'évolution des performances de la classification.	202
Figure 4.16. Résultat de l'analyse factorielle discriminante.	203
Figure 4.17. Résultats de la matrice de confusion.....	204
Figure 4.18. Exemple d'un secteur cartographié à partir du modèle de détection de méso-habitats. A : chenal en eau / B : chenal segmenté en polygones intra-chenaux / C : carte des méso-habitats.	205
Figure 4.19. Densité de lisière (en m / m ²) par styles fluviaux.....	208
Figure 4.20. Indice de diversité de Shannon par styles fluviaux.....	209
Figure 4.21. Fragmentation : indice moyen de dimension fractale par styles fluviaux et taille moyenne des taches (en m ²).....	210
Figure 4.22. Schéma conceptuel de l'étude des habitats aquatiques à partir d'indice de texture et de l'analyse du signal.	216
Figure 4.23. Comparaison de la distribution des valeurs radiométriques entre un signal à forte variabilité (A) et un à faible variabilité (B).	217
Figure 4.24. Exemple d'un indice de texture présentant un secteur rugueux (B) et un secteur non rugueux (A).....	218
Figure 4.25. Présentation d'un signal non périodique (A) (structure homogène) et d'un signal périodique avec une alternance des faciès (B).	219
Figure 4.26. Clé de détermination pour l'étude des habitats aquatiques de manière longitudinale.	221

Annexes

Pavages du plan temps fréquence pour la représentation temps fréquence et la représentation temps échelle (Bernard, 1999).....	263
Exemples schématiques de différentes ondelettes mères.	264

Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude

Tableau 1.1. Exemples de zonations, selon un gradient amont /aval (liste non exhaustive) (complété d'après Wasson (1989) et Malavoi et Bravard (2010))......23

Tableau 1.2. Systèmes hiérarchisés spatio-temporels (d'après (Schmitt, 2001)).....26

Tableau 1.3. Exemples de systèmes hiérarchisés et emboîtés (liste non exhaustive).27

Tableau 1.4. Inventaire d'outils évaluant l'état hydromorphologique des cours d'eau en France (liste non exhaustive).39

Tableau 1.5. Liste des capteurs et vecteurs utilisés en télédétection (liste non exhaustive) modifiée d'après (Wiederkehr et al., 2008).50

Tableau 1.6. Études réalisées à partir d'images sur la thématique des systèmes fluviaux (liste non exhaustive) d'après Piégay et al. (2012).53

Tableau 1.7. Définition des différents termes utilisés pour désigner la résolution spatiale des différents capteurs (d'après(Puissant, 2003)).....55

Tableau 1.8. Présentation des différents facteurs déterminant le choix d'un couple capteur / plate-forme ou d'un type d'image.56

Tableau 1.9. Présentation des niveaux de satisfaction.56

Tableau 1.10. Caractéristiques de la BD Ortho de l'IGN® (Wiederkehr et al., 2008).71

Tableau 1.11. Caractéristiques des données brutes utilisées pour l'extraction de l'image à l'intérieur du fond de vallée (Wiederkehr et al., 2009).71

Tableau 1.12. Présentation des avantages et des inconvénients de la BD Topo® par rapport aux orthophotographies.73

Partie 2. Méthode générale

Tableau 2.1. Règles de fusion des polygones « bancs », « eau » et « eau + bancs » pour créer les polygones « Chenal à galets » et « Chenal en eau ». (1 : présence / 0 : absence).86

Tableau 2.2. Présentation succincte des différentes méthodes de classification.88

Tableau 2.3. Présentation des métriques retenues pour la classification.90

Tableau 2.4. Matrice de confusion de la classification.91

Tableau 2.5. Exemples de conditions nécessaires à une bonne identification des objets.92

Tableau 2.6. Présentation des différentes métriques pouvant être extraites par unité spatiale.99

Tableau 2.7. Récapitulatif des différentes méthodes de traitement du signal avec leurs avantages et inconvénients (Wiederkehr et al., 2009).103

Tableau 2.8. Exemples de métriques pouvant être extraites à partir de l'image (liste non-exhaustive) (Wiederkehr et al., 2008).105

Tableau 2.9. Exemples d'indicateurs (Wiederkehr et al., 2008).106

Partie 3. Étude à l'échelle du tronçon fluvial

Tableau 3.1. Métriques extraites par tronçons géomorphologiques homogènes utilisées dans le cadre de la pré-identification des sites potentiellement de types géomorphosites.124

Tableau 3.2. Présentation des métriques extraites pour caractériser les secteurs à fond de vallée étroit (NR : Non Renseigné).128

Tableau 3.3. Caractéristiques des styles fluviaux déterminés sur la Drôme.129

Tableau 3.4. Liste des erreurs dans l'extraction des métriques.145

Tableau 3.5. Récapitulatif des métriques extraites par tronçon géomorphologique homogène.145

Tableau 3.6. Champs attributaires composant la base de données BD RMC – Physique150

Tableau 3.7. Métriques utilisées pour la mise en place de la typologie régionale.154

Tableau 3.8. Indices de confiance par métriques et par type170

Tableau 3.9 : Présentation des segments (après fusion des TGH adjacents de même type) par types.171

Partie 4. Étude à l'échelle du faciès

Tableau 4.1. Métriques extraites par la fonction « statistiques zonales » d'Arc Map.193

Tableau 4.2. Métriques de formes extraites à partir du module ET Geowizard.201

Tableau 4.3. Données caractérisant les taches composant le chenal en eau.208

Partie 5. Conclusion générale

Tableau 5.1. Nombre de publications scientifiques sur la période 1970 – 2013 ayant pour mots clés : « Nom de la rivière » et « Fluvial geomorphology » (Source : Elsevier, base non exhaustive).227

Tableau 5.2. Synthèse des documents livrables à l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.234

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	3
Sommaire	7
Résumé	9
Abstract	11
Préambule	13
A. Contexte de recherche	15
B. Organisation générale du manuscrit	16
Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude	17
A. Cadre scientifique	21
1. Cadre thématique : caractérisation physique des cours d'eau à large échelle	21
1.1. Structure et organisation spatiale des cours d'eau	21
1.1.1. Définition du système fluvial et de l'hydrosystème fluvial	21
1.1.2. Concept d'hydrosystème fluvial	25
a) Système à quatre dimensions	25
b) Système hiérarchisé et emboîté	26
1.2. Évaluation de la qualité physique d'un cours d'eau	29
1.2.1. Comment définir l'état physique d'un cours d'eau ?	29
a) Qu'entend-on par hydromorphologie d'un cours d'eau ?	29
b) Qu'est-ce que le bon état hydromorphologique ?	30
c) Qu'est-ce qui altère ce bon état ?	30
1.2.2. Au sens de la Directive Cadre Européenne sur l'eau	31
a) Attéinte du bon état écologique : une obligation de résultat	31
b) Bon état écologique	31
c) Évaluation de l'état écologique	32
État biologique : premier indicateur d'évaluation de la qualité écologique	33
États physico-chimique et physique : en second plan	33
d) Évaluation de l'état chimique	33
1.2.3. Outils d'évaluation de l'état physique des cours d'eau : en France et à l'étranger	34
a) Premiers outils mis en place en France	34
b) Vers une harmonisation nationale, voire européenne	36
Approche nationale	36
Standardisation européenne	37
1.3. Différentes méthodes de classement des cours d'eau	41
1.3.1. Classification des cours d'eau	41
a) Approche taxonomique	41
b) Approche typologique	41
1.3.2. Typologie : un outil de catégorisation des milieux aquatiques	41
a) Mise en place d'une typologie	42
b) Typologie fonctionnelle : un outil de gestion	42
c) Objectifs	43
1.3.3. Régionalisation	43
a) ... une classification spatialisée particulière	44
b) ... un outil multifonctions	44
c) Deux approches	44
2. Cadre méthodologique : apports de la géomatique et outils d'analyses	45
2.1. Inventaire des contraintes liées à l'élaboration d'indicateurs de l'état physique des corridors fluviaux à large échelle	45
2.2. Quels sont les apports de la géomatique pour les études des milieux fluviaux à l'échelle d'un réseau hydrographique ?	46
2.3. La télédétection : outil de traitement de l'image	46
2.3.1. Bases de la télédétection	46
2.3.2. Quelles images choisir ?	47
a) Résolution spatiale : quel niveau d'information explorer ?	48
b) Résolution spectrale : quelles ondes radiométriques privilégier ?	48
c) Résolution temporelle : la fréquence d'acquisition des données	49

d) Coût des images et qualité de l'information	51
2.3.3. L'utilisation de l'image pour l'étude des systèmes fluviaux	51
2.3.4. Les sources d'information adaptées à une étude large échelle.....	54
a) Les données matricielles	54
Les images	54
Les Modèles Numériques de Terrain	57
b) Les données vectorielles	57
2.4. Le Système d'Information Géographique : outil d'analyse et de gestion.....	58
2.4.1. Généralités.....	58
2.4.2. Exemples d'applications	58
2.5. Logiciels utilisés pour le traitement et la gestion des données	59
2.6. Analyse quantitative des données : les outils statistiques.....	59
2.6.1. Métriques descriptives	59
2.6.2. Analyse multidimensionnelle des données et modélisation.....	60
3. Problématique de recherche.....	62
B. Cadre géographique et sources de données	65
1. Cadre géographique.....	65
1.1.1. Bassin Rhône Méditerranée Corse	65
a) Cadre administratif	65
b) Le Rhône	66
c) Principaux affluents	69
1.1.2. Bassin de la Drôme.....	69
2. Sources de données utilisées.....	70
2.1. Description des données rasterisées : la BD Ortho®.....	70
2.2. Description des données vectorielles.....	71
2.2.1. La BD Topo®.....	72
2.2.2. La BD Carthage®.....	73
2.2.3. Le Réseau Hydrographique Théorique (RHT)	73
Partie 2. Méthode générale	75
A. Prétraitement de données brutes.....	79
1. Objectif: homogénéisation des données.....	79
2. Simplification des données vectorielles.....	79
3. Optimisation du temps de traitement des orthophotographies.....	82
3.1. Procédure d'extraction d'images à l'intérieur du fond de vallée	82
3.2. Réduction des problèmes de luminosité.....	84
B. Extraction d'objets élémentaires	85
1. Au sein de la bande fluviale à partir de données vectorielles	85
2. Au sein du fond de vallée à partir de données rasters	87
2.1. Objectif : vectoriser la bande naturelle.....	87
2.2. Rappel des différentes méthodes de classification des images	87
2.3. Procédure d'extraction des objets par méthode orientée-objet.....	88
2.3.1. Segmentation de l'image	89
2.3.2. Classification de l'image.....	89
2.3.3. Validation quantitative de la classification	90
2.4. Problèmes pouvant influencer la qualité de la détection des objets	92
C. Création d'unités spatiales	93
1. Objectif: mettre en place une unité de base pour l'analyse spatiale.....	93
2. Unités spatiales extraites des données vectorielles : les objets géographiques désagrégés (DGO)	94
3. Unités spatiales extraites des données rasters : les polygones intra-chenaux.....	96
4. Unités spatiales réagrégées.....	96
D. Extraction de métriques	98
1. Caractérisation des objets élémentaires par des métriques brutes	98
1.1. Métriques issues des données vectorielles	98
1.2. Métriques issues des données matricielles.....	100
2. Construction de métriques synthétiques par agrégation spatiale.....	101
3. Extraction d'une structure spatiale par les métriques structurales.....	101
3.1. ... par détection de rupture	101
3.2. ... par analyse du signal.....	101
4. Construction de métriques temporelles par agrégation d'états.....	104
E. Élaboration d'indicateurs d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau	106
Partie 3. Étude à l'échelle du tronçon fluvial	109
Chapitre 1. Localisation et caractérisation des sites à forts potentiels patrimoniaux par requêtes spatiales et attributaires. Application à la Drôme.	113
A. Introduction.....	117
1. Géomorphosites et réseaux hydrographiques.....	117

2. Inventaire exhaustif des géomorphosites	117
3. Objectifs.....	118
B. Outils et méthode.....	120
1. Données brutes	120
2. Mise en forme des données	120
3. De l'objet géographique à l'extraction de métriques.....	122
3.1. Construction de tronçons géomorphologiques homogènes	122
3.2. Extraction de métriques.....	123
4. Identification des sites en gorges	124
5. Identification des corridors fluviaux à haut potentiel écologique.....	125
5.1. Détermination par les styles fluviaux.....	125
5.2. Détermination par densité d'écotones.....	126
C. Identification de sites à fort potentiel patrimonial	127
1. Localisation et caractérisation des secteurs en gorges.....	127
2. Localisation et caractérisation des corridors fluviaux à haut potentiel écologique.....	128
2.1. Caractérisation par les styles fluviaux.....	128
2.2. Caractérisation par l'approche écotonale.....	131
D. Synthèse et discussion	133
1. Les bases de données info-cartographiques, des sources clés pour une pré-identification des géomorphosites.....	133
2. L'utilisation de l'imagerie : des défis encore à relever.....	134
Chapitre 2. Création d'indicateurs pour l'évaluation de l'état biophysique d'un réseau hydrographique par interrogation d'un Système d'Information Géographique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse	135
A. Introduction.....	139
B. Outils et méthode.....	140
1. Sectonisation du réseau hydrographique en Tronçons Géomorphologiques Homogènes (TGH)	140
1.1. Méthode d'extraction des tronçons géomorphologiques homogènes.....	140
1.2. Détermination du réseau hydrographique utilisé pour la base de données spatialisée.....	141
2. Extraction de métriques par Tronçons Géomorphologiques Homogènes	144
2.1. Métriques issues de données vectorielles surfaciques et linéaires.....	144
2.1. Métriques issues du Réseau Hydrographique Théorique.....	144
3. Création d'une base de données spatialisées de mesures physiques du corridor fluvial à l'échelle du bassin RMC	149
C. Exemples d'utilisation de la base de données spatialisée de mesures physiques du bassin Rhône Méditerranée Corse	152
1. Typologie régionale de la morphologie des cours d'eau.....	153
1.1. Méthode.....	153
1.1.1. Les paramètres de classification	153
1.1.2. Traitement et analyse des données	155
a) ... des tronçons géomorphologiques homogènes « sans bande active »	155
b) ... des tronçons géomorphologiques homogènes « avec bande active »	157
1.2. Résultats.....	158
1.2.1. Classification ascendante hiérarchique sur les TGH « sans bande active »	158
1.2.2. Classification ascendante hiérarchique sur les TGH avec bande active.....	158
1.2.3. Identification des styles fluviaux à l'échelle du bassin RMC.....	161
1.3. Estimation de la pertinence de la typologie des cours d'eau à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse	168
1.3.1. Méthode.....	169
1.3.2. Résultats.....	170
1.4. Bases pour une analyse à l'échelle régionale.....	171
2. Interrogation de la base de données pour identifier les secteurs à haute valeur patrimoniale.....	172
2.1. Méthode.....	172
2.2. Résultats.....	173
3. Interrogation de la base de données pour déterminer des secteurs présentant une forte mobilité latérale potentielle.....	174
3.1. Méthode.....	174
3.2. Résultats.....	175
D. Synthèse et discussion	177
1. Typologie à l'échelle régionale.....	177
2. Base de données : perspectives d'améliorations.....	177
Partie 4. Étude à l'échelle du faciès	179
A. Introduction.....	183
1. L'habitat aquatique : lieu de vie des espèces piscicoles	183
1.1. Définition de l'habitat aquatique	183
1.2. L'habitat aquatique vu à différentes échelles	183
1.2.1. Description des habitats aquatiques.....	184
a) Modélisation des microhabitats	184
b) Cartographie des méso-habitats	184
1.3. Relation entre habitats aquatiques et unités hydromorphologiques	185

1.3.1. Généralités.....	185
1.3.2. Exemples de typologies de faciès hydromorphologiques.....	186
a) Selon Malavoi et Souchon (2002).....	186
b) Selon Moir et Pasternack (2008).....	188
2. Outil géomatique pour caractériser l'habitat aquatique à large échelle.....	189
3. Objectif.....	189
B. Détection des méso-habitats de type « mouilles » à partir des valeurs radiométriques.....	191
1. Objectif double.....	191
2. Outils et méthode.....	191
2.1. Site d'étude : la partie aval de la Drôme.....	191
2.2. Modèle de régression logistique : principe général.....	192
2.3. De l'image aux métriques.....	193
2.4. La régression logistique comme outil de prédiction d'occurrence des mouilles.....	194
3. Détection (semi-) automatique des secteurs en mouilles.....	194
4. Quelles leçons en tirer ?.....	196
C. Détection et caractérisation des méso-habitats aquatiques par une approche semi-automatique.....	197
1. Objectifs.....	197
2. Outils et méthode.....	197
2.1. Identification des méso-habitats par une approche orientée-objet.....	197
2.1.1. Création d'un jeu de données « initial ».....	198
2.1.2. Identification des méso-habitats à partir des polygones intra-chenaux.....	199
a) Classification manuelle et extraction de métriques pour un échantillon de polygones intra-chenaux.....	199
b) Élaboration d'un modèle statistique de reconnaissance des méso-habitats.....	201
Calibration du modèle.....	202
Validation du modèle statistique.....	204
c) Cartographie des habitats à large échelle.....	204
2.2. Caractérisation de la structure des habitats aquatiques.....	205
2.2.1. Les indices paysagers : éléments d'analyse quantitative de la structure de la mosaïque des habitats aquatiques.....	205
a) Approche basée sur les concepts de l'écologie du paysage.....	205
b) Indicateurs paysagers.....	206
c) Utilisation d'un SIG.....	207
3. Analyse quantitative du paysage aquatique de la partie aval de la Drôme.....	207
3.1. Caractérisation des méso-habitats à l'échelle du linéaire drômois.....	207
3.2. Caractérisation des méso-habitats par style fluvial.....	208
D. Synthèse et discussion.....	211
1. Classification orientée-objet : outil d'identification des habitats aquatiques à large échelle.....	211
1.1. Les bénéfices de l'approche orientée-objet.....	211
1.2. Prospective : comment améliorer la procédure d'identification des différents types d'habitats ?.....	211
1.2.1. Amélioration des règles de segmentation.....	211
1.2.2. Affinage du nombre de type de méso-habitats.....	211
2. Utilisation des orthophotographies de la BD Ortho® : véritable apport pour la détection des méso-habitats ?.....	212
3. Caractérisation des habitats aquatiques à large échelle.....	213
3.1. Avantages des outils géomatiques.....	213
3.2. Intérêt de l'approche paysagère pour automatiser la caractérisation des habitats aquatiques.....	213
E. Perspectives : étude longitudinale des habitats aquatiques.....	215
1. Principe général.....	215
2. Outils et méthode.....	215
3. Pistes à explorer.....	216
3.1. Variabilité de la hauteur d'eau par analyse du signal intra-segment.....	216
3.2. Rugosité locale par analyse d'un indice de texture.....	217
3.3. Séquence seuil / mouille.....	218
4. Conclusion.....	218
Partie 5. Conclusion générale.....	223
A. Rappel des objectifs de la thèse.....	227
B. Apports méthodologiques et pratiques.....	229
1. L'imagerie en géomorphologie fluviale : un avenir prometteur.....	229
2. Une base de données à l'échelle du bassin rhodanien.....	231
3. Les intérêts opérationnels.....	233
C. Perspectives scientifiques.....	235
Références bibliographiques.....	237
Tables des illustrations.....	251
Table des matières.....	255
Annexes.....	259



Annexes

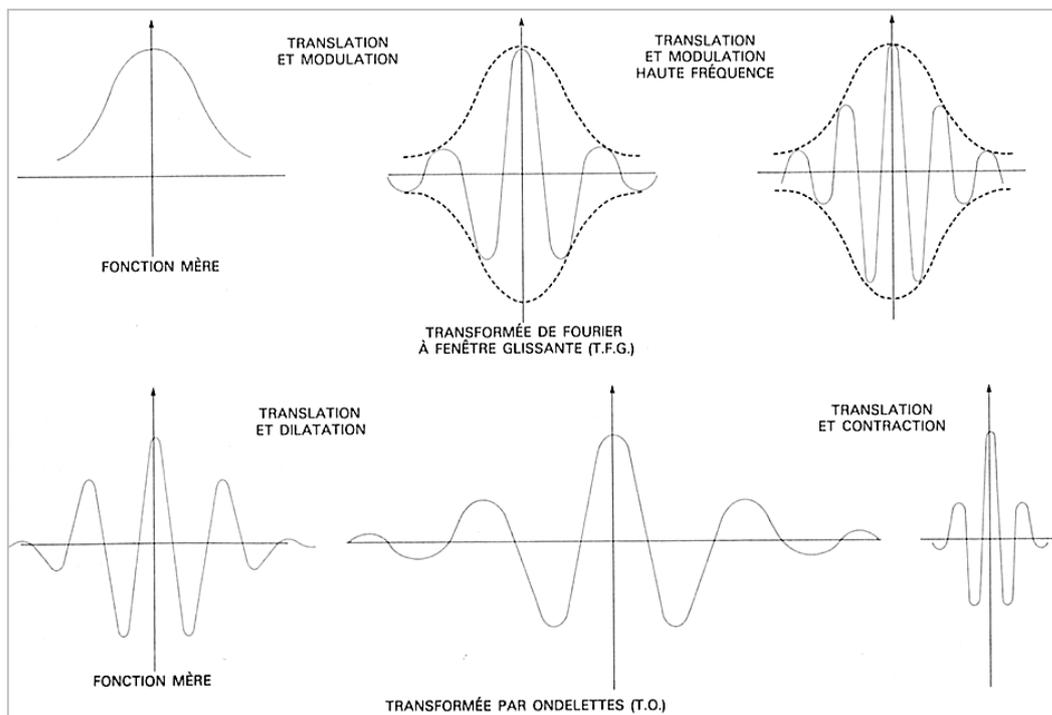
1. De l'analyse de Fourier aux ondelettes de Gabor
2. Typologie régionale
3. Cartes des débits et puissance brute

1. DE L'ANALYSE DE FOURIER AUX ONDELETTES DE GABOR

C'est en 1807 que Joseph Fourier a montré qu'une fonction pouvait « s'écrire » comme la somme de plusieurs sinusoides de fréquences différentes. La décomposition du signal se fait en appliquant des coefficients multiplicateurs aux amplitudes, permettant de leur attribuer plus ou moins d'importance et en décalant les phases, de sorte qu'on puisse les additionner ou les compenser. On obtient alors une nouvelle fonction exprimant le nombre de sinusoides de chaque fréquence qui compose le signal d'origine. Cette fonction est nommée la transformée de Fourier, notée TF, de la fonction originale. On parle d'une série de Fourier, lorsqu'elle s'applique à une fonction périodique.

Concrètement, il s'agit de transformer une fonction, dépendant du temps, en une autre fonction dépendant de la fréquence. Autrement dit, la fonction (ou signal), défini dans un domaine original est transformée dans un autre domaine, nommé domaine fréquentiel ou domaine transformé.

L'application de la TF ne se limite pas uniquement aux fonctions variant dans le temps, mais également à celles variant dans l'espace. D'un côté, on a la fréquence temporelle qui se définit comme l'inverse du temps, et d'autre part, la fréquence spatiale (ou nombre d'ondes) qui correspond à l'inverse de la longueur. Bien qu'enregistrant la même information, la TF et le signal d'origine n'utilisent pas le même langage pour l'exprimer. Alors que le signal est défini dans l'espace réel et qu'il apporte une information sur son évolution temporelle ou spatiale, la TF, définie dans l'espace réciproque, ou espace de Fourier, ou « K-space » met en exergue des informations relatives aux fréquences.



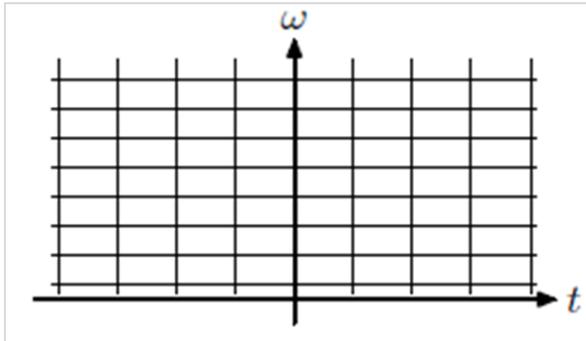
Le signal et sa transformée (Meyer et al., 1987).

Les informations sur le temps ou l'espace sont « cachées » dans la TF au niveau des phases, autrement dit au niveau des décalages existant entre les sinusoides. La TF n'apportant pas d'information sur le temps, celle-ci ne peut pas s'appliquer à des signaux caractérisés par des changements brusques. Elle permet d'avoir une idée sur la régularité du signal (variation rapide ou lente), mais elle ne permet pas la localisation de l'information. Si la TF a de faibles valeurs pour des valeurs élevées de la fréquence, ceci veut dire que le signal varie rapidement, au moins dans certaines zones, et inversement.

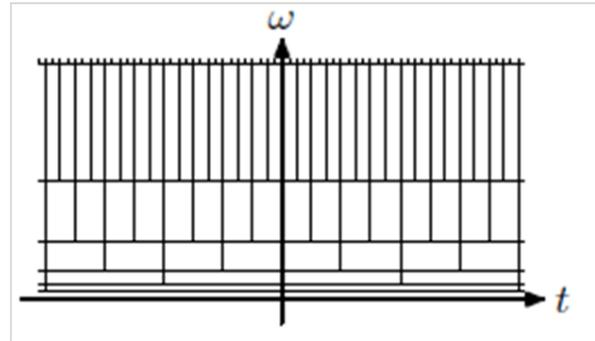
C'est à Dennis Gabor que l'on doit la possibilité d'analyser un signal à la fois dans le temps et dans l'espace. Il est à l'origine de l'application de « fenêtres » à la TF. Le signal est découpé en plages temporelles, également appelés des fenêtres. Sur chacune de ces plages, on applique une analyse de Fourier. Une fois la plage analysée, on passe à la suivante. C'est pourquoi on parle de transformée de Fourier à fenêtre glissante.

L'inconvénient de cette méthode porte sur la longueur de la fenêtre, ou échelle, qui reste fixe, ne permettant donc pas de prendre en compte les phénomènes dont les échelles de temps sont très différentes. Bien que le signal soit représenté en fonction du temps et de la fréquence, une analyse multi-échelle (multi-résolution) permettrait de compléter l'analyse du signal. Comme cela était indiqué précédemment, ces approches temporelles s'appliquent aussi à des distances géographiques.

Temps - fréquence



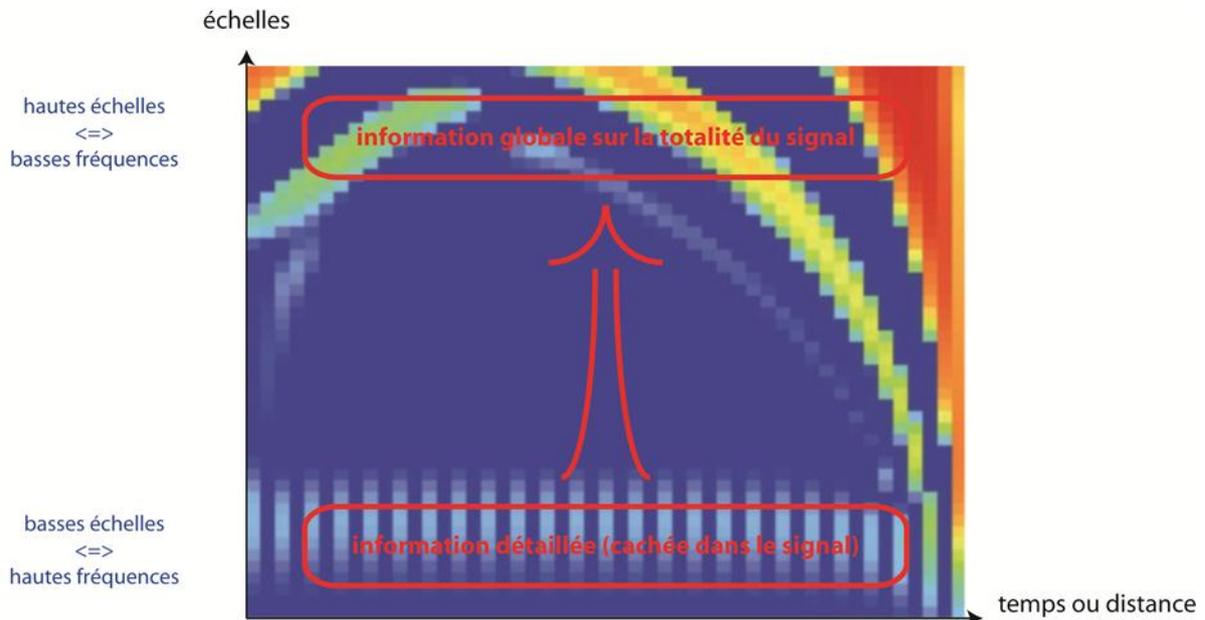
Temps - échelle



Pavages du plan temps fréquence pour la représentation temps fréquence et la représentation temps échelle (Bernard, 1999).

L'analyse multi-échelle : les ondelettes

Pour faire face à cette difficulté, Morlet a préféré modifier la taille de la fenêtre plutôt que de faire varier le nombre d'oscillations au sein de cette fenêtre, comme le faisait Gabor. Il garde le nombre d'oscillations constantes en faisant varier la taille de la fenêtre par *contraction et dilatation*. Pour tenir compte de la régularité locale, l'analyse par ondelettes adopte le concept d'échelle. Les méthodes précédentes ne s'attachaient qu'au concept de fréquence. La transformée en ondelettes est une fonction à deux variables : le temps ou la distance et l'échelle.



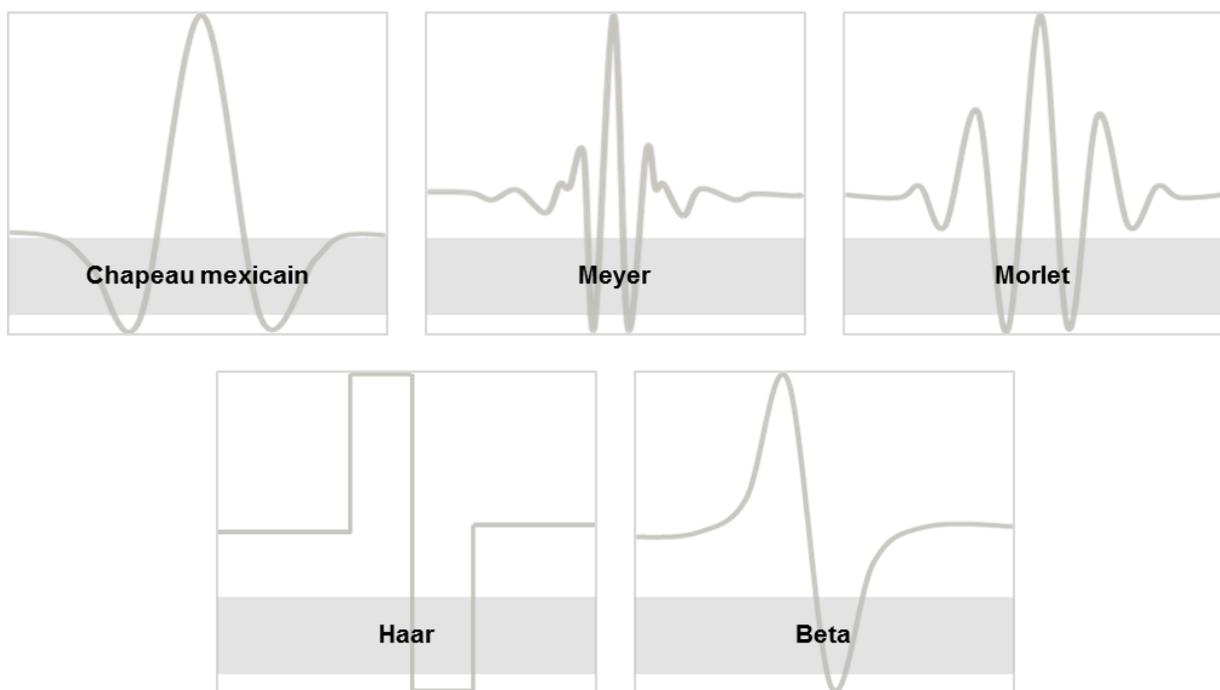
Exemple de lecture d'une ondelette de Morlet.

En jouant sur le facteur d'échelle, on fait une sorte de zoom avant / arrière sur une portion du signal. Les ondelettes s'adaptent automatiquement aux différentes composantes du signal : fenêtre étroite pour regarder les composantes de haute fréquence et fenêtre large pour regarder les composantes de longue durée, de basses fréquences. Elles sont de formes constantes, ne se

différenciant que par leur taille. C'est à ce niveau que se trouve la différence avec les fenêtres de Gabor, les ondelettes sont translattées et dilatées tandis que les fenêtres de Gabor sont déplacées et modulées.

Le signal correspond à la somme des ondelettes. L'analyse du signal se fait avec la même fonction. On part d'une fonction, appelée « ondelette-mère », qui est localisée et oscillante. Ensuite cette ondelette engendre d'autres ondelettes par dilation¹⁰ et translation. Les ondelettes sont localisées en temps ou distance et en fréquence, et doivent leur caractère localisé au fait que la fonction est non nulle sur un intervalle fini, et nulle partout ailleurs. Par rapport à la transformée de Fourier, l'analyse en ondelettes a des résolutions temporelles / spatiales et fréquentielles différentes en tous points du plan temps-fréquence ou espace- fréquence.

Le signal est d'abord étudié à la résolution la plus fine. L'algorithme répétera la procédure à une résolution demie de la précédente tant que le signal n'aura pas perdu sa substance. En général, cinq niveaux de résolutions sont utilisés.



Exemples schématiques de différentes ondelettes mères.

La régularité d'une fonction se traduit par sa rapidité à varier. Plus une fonction est régulière, plus vite décroissent ses coefficients d'ondelettes quand l'échelle décroît, et inversement. L'analyse en ondelettes facilite l'étude des discontinuités temporelles ou longitudinales (variations très rapides, sauts, marches) car l'ondelette détecte ces singularités.

¹⁰. Dilater dans le sens d'étirer et de comprimer.

En fonction de l'échelle, l'information sur le signal sera plus ou moins détaillée :

- ✓ les basses fréquences apportent une information globale, non détaillée, généralement sur la durée entière du signal.
- ✓ les hautes fréquences offrent une vision beaucoup plus détaillée d'un modèle, se produisant sur un temps ou une distance relativement court, et qui est caché dans le signal.

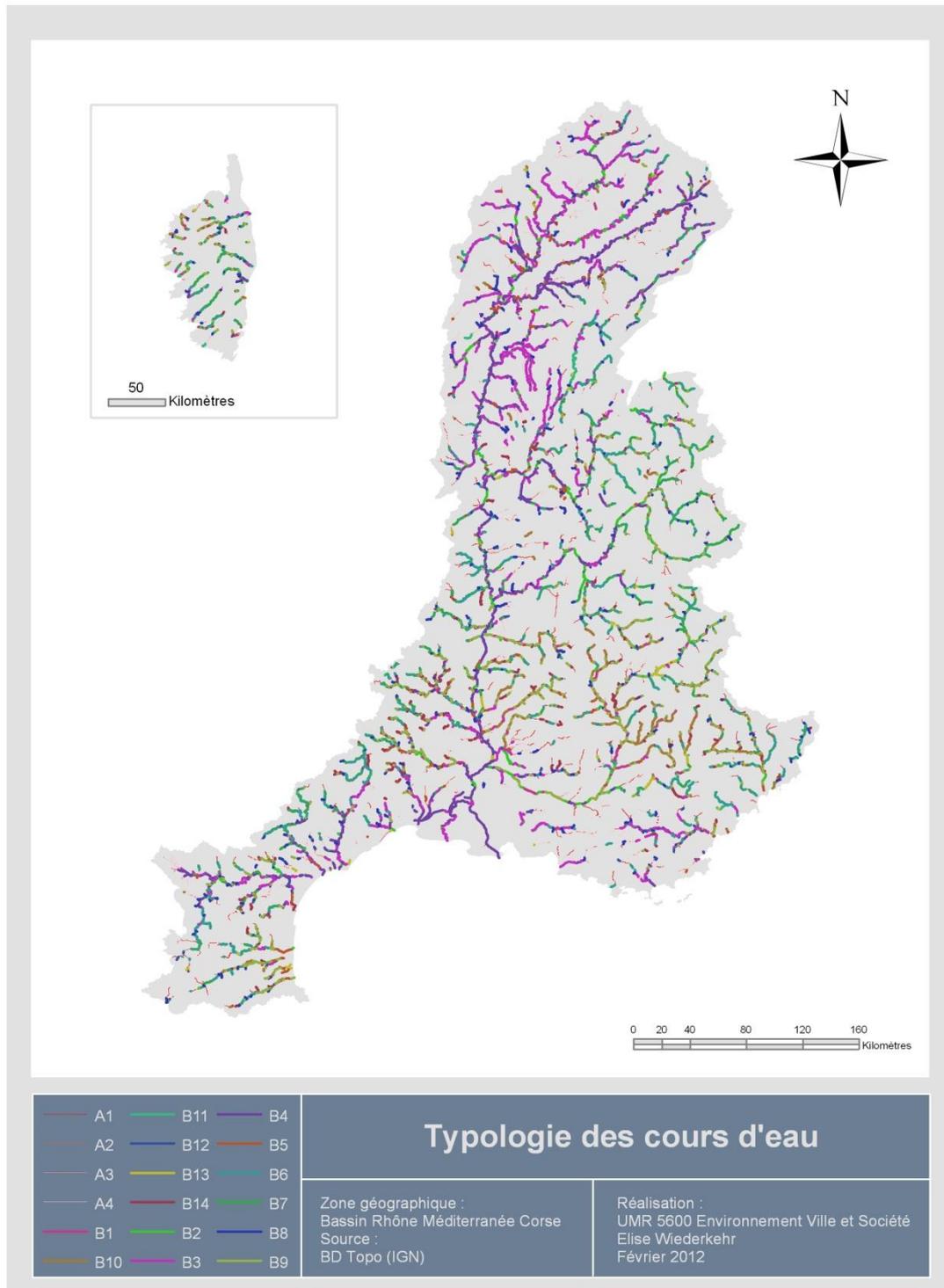
L'échelle comme une opération mathématique, dilate ou comprime un signal. Les grandes échelles correspondent aux signaux dilatés et les petites échelles aux signaux comprimés. La valeur du paramètre d'échelle (a) est toujours positive :

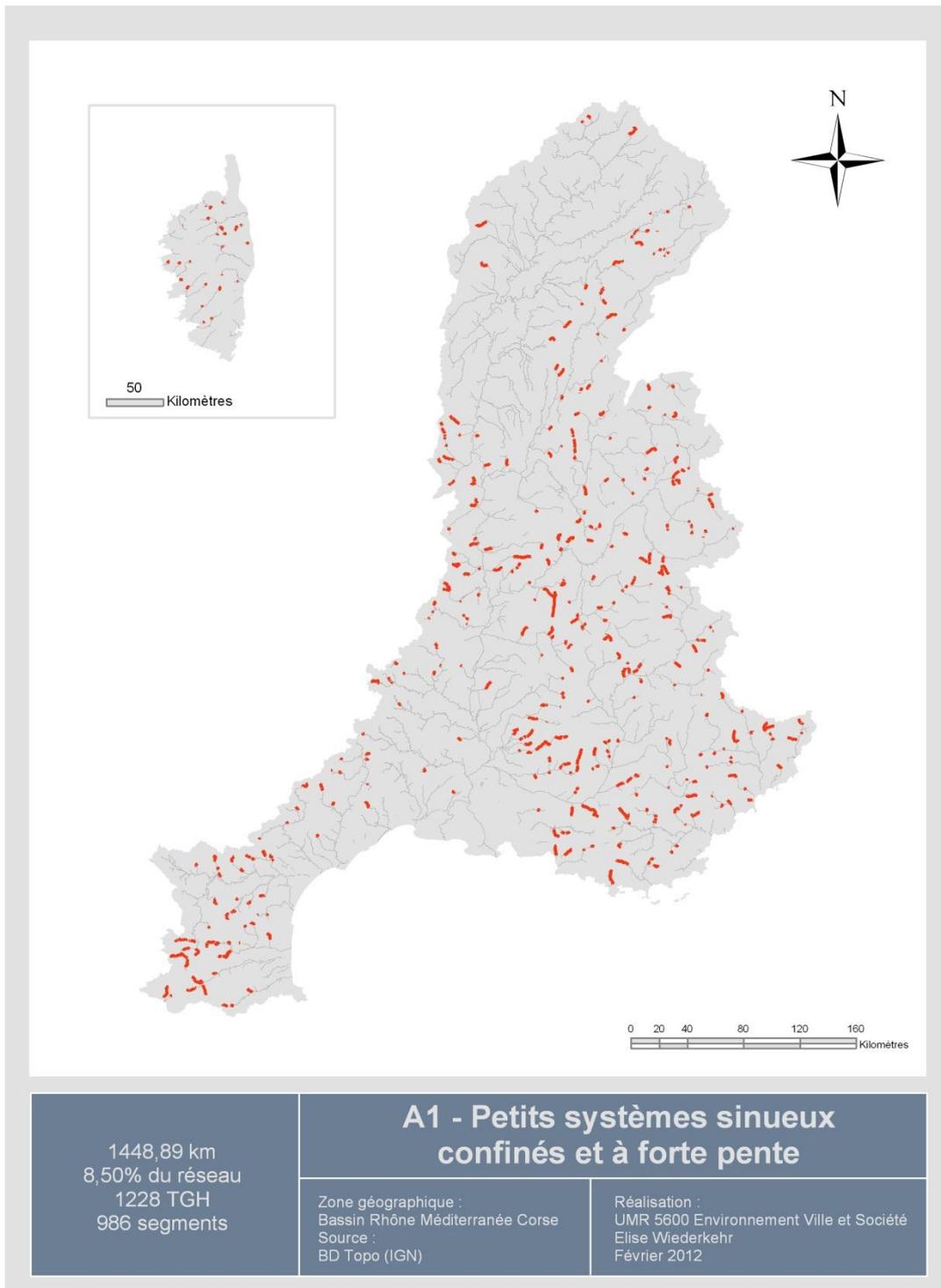
- ✓ si $a < 1$: la fonction d'ondelettes est contractée.
- ✓ si $a > 1$: la fonction d'ondelettes est dilatée.

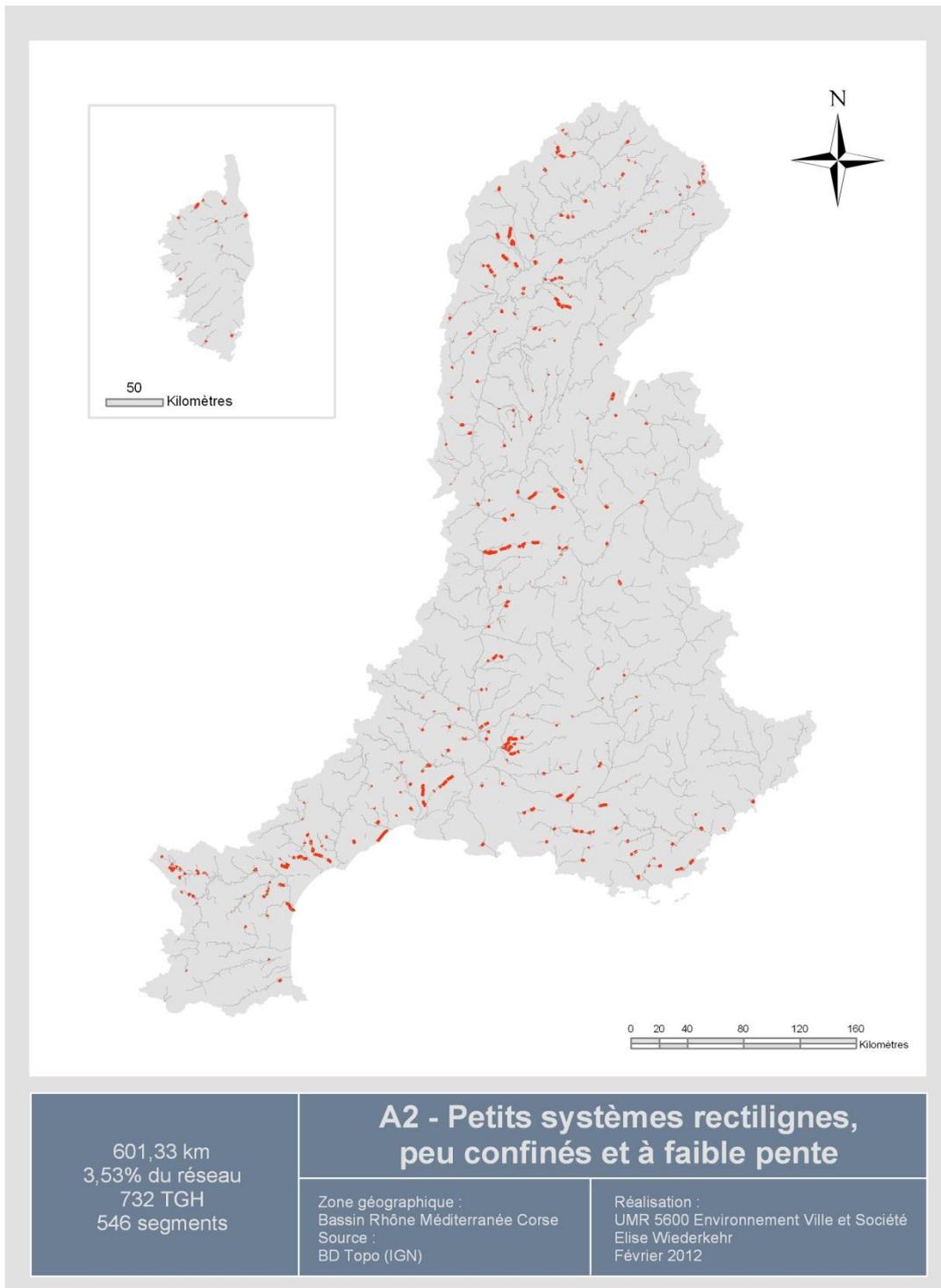
Pour conserver l'énergie de l'ondelette d'une échelle à l'autre il suffit d'utiliser le coefficient pondérateur $|a|^{-1/2}$.

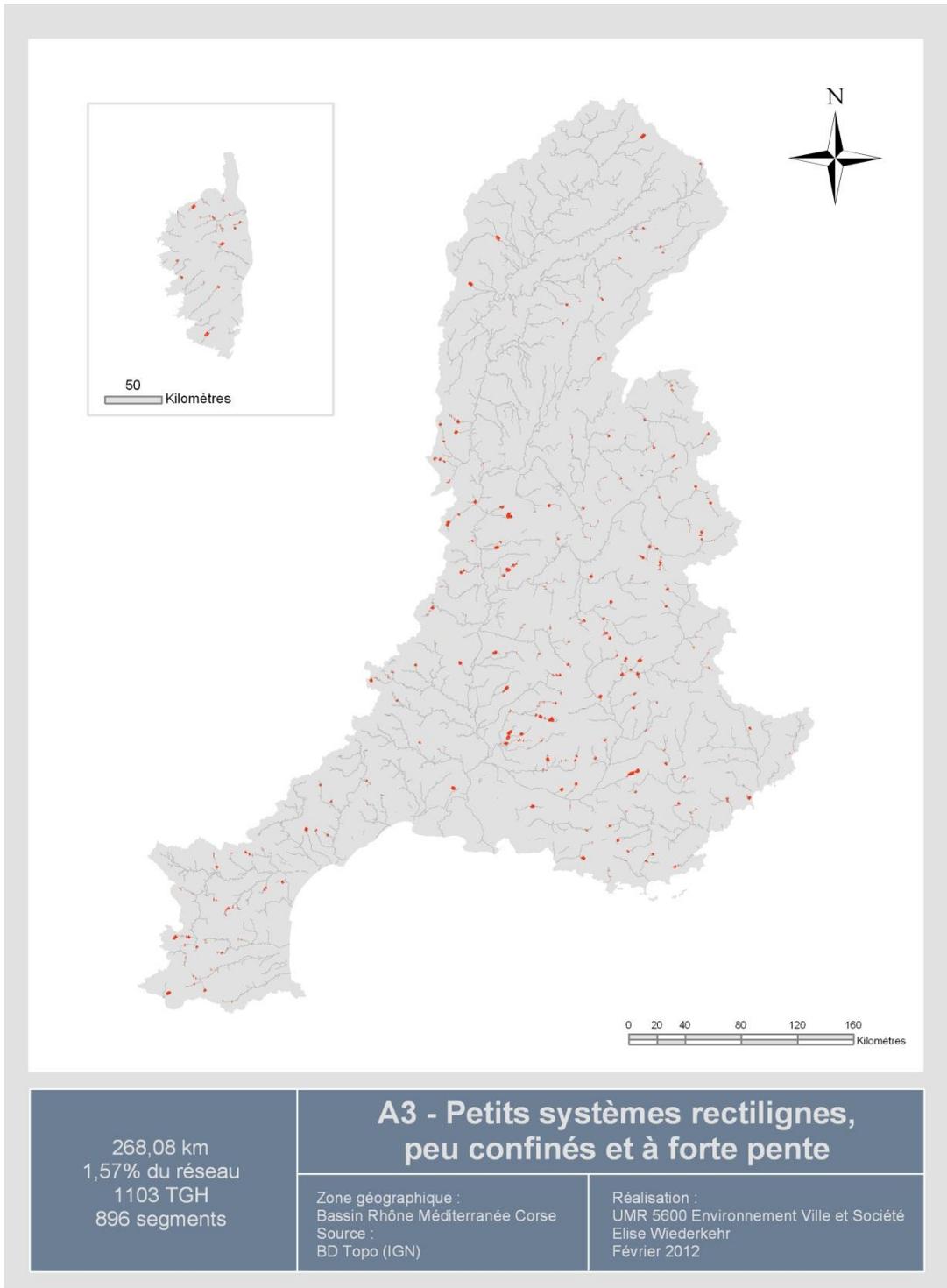
L'objectif de la fonction ondelette est de pouvoir analyser les composantes de haute et basse fréquences du signal en adoptant automatiquement une résolution temps (ou distance) – fréquence adéquate. L'*aire temps (ou distance) – fréquence* des ondelettes est constante, car indépendante du paramètre d'échelle.

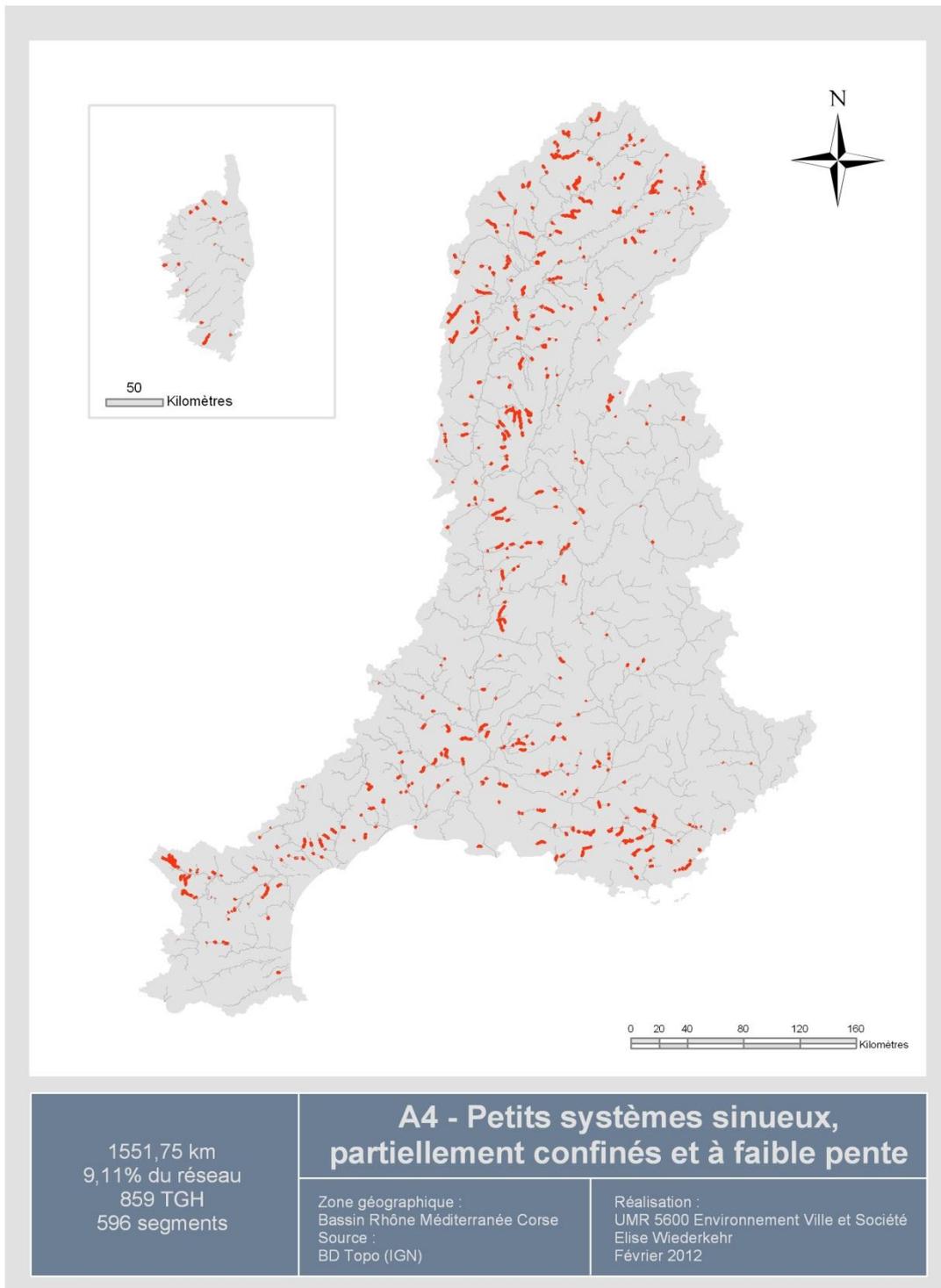
2. TYPOLOGIE REGIONALE

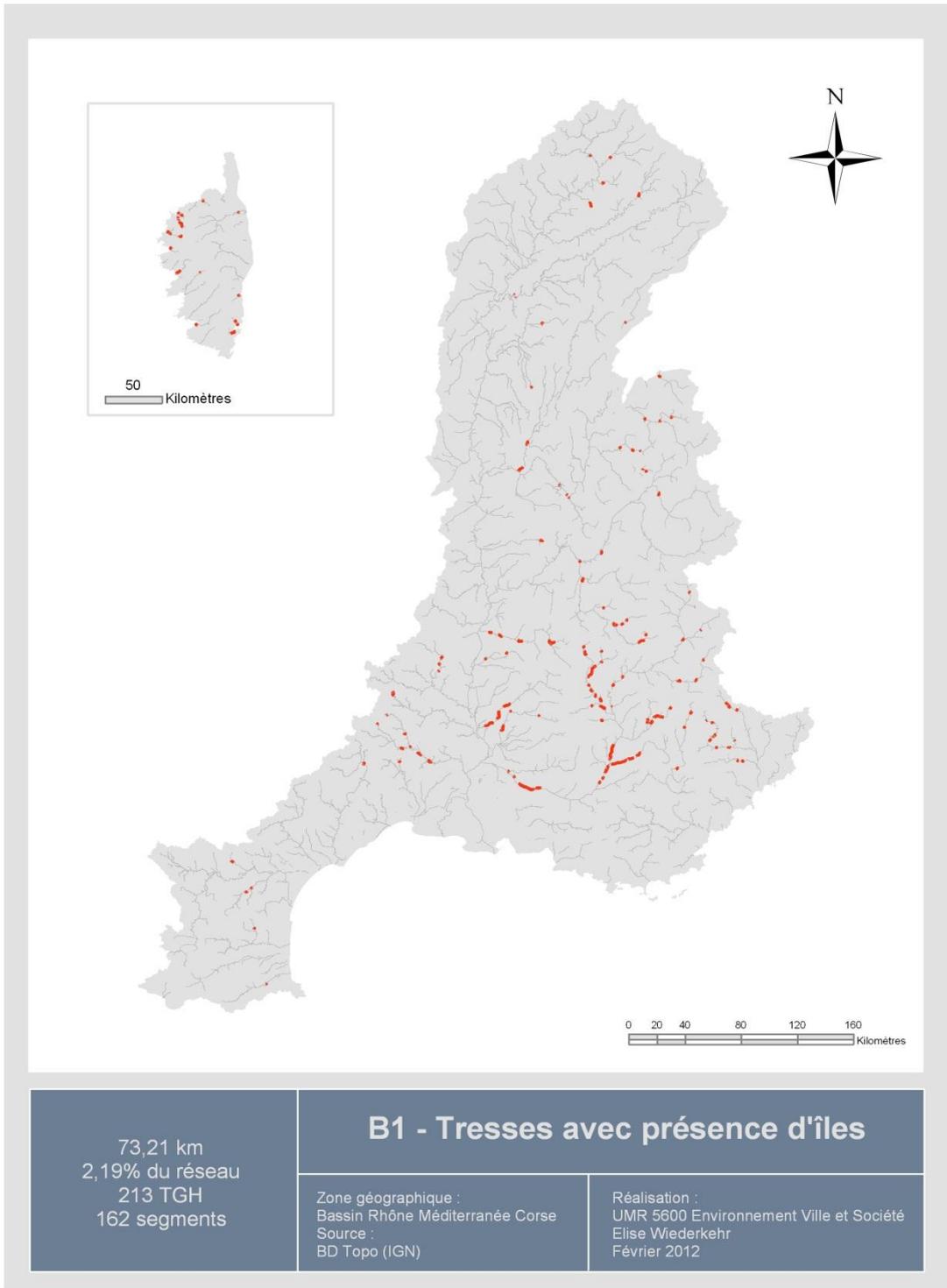


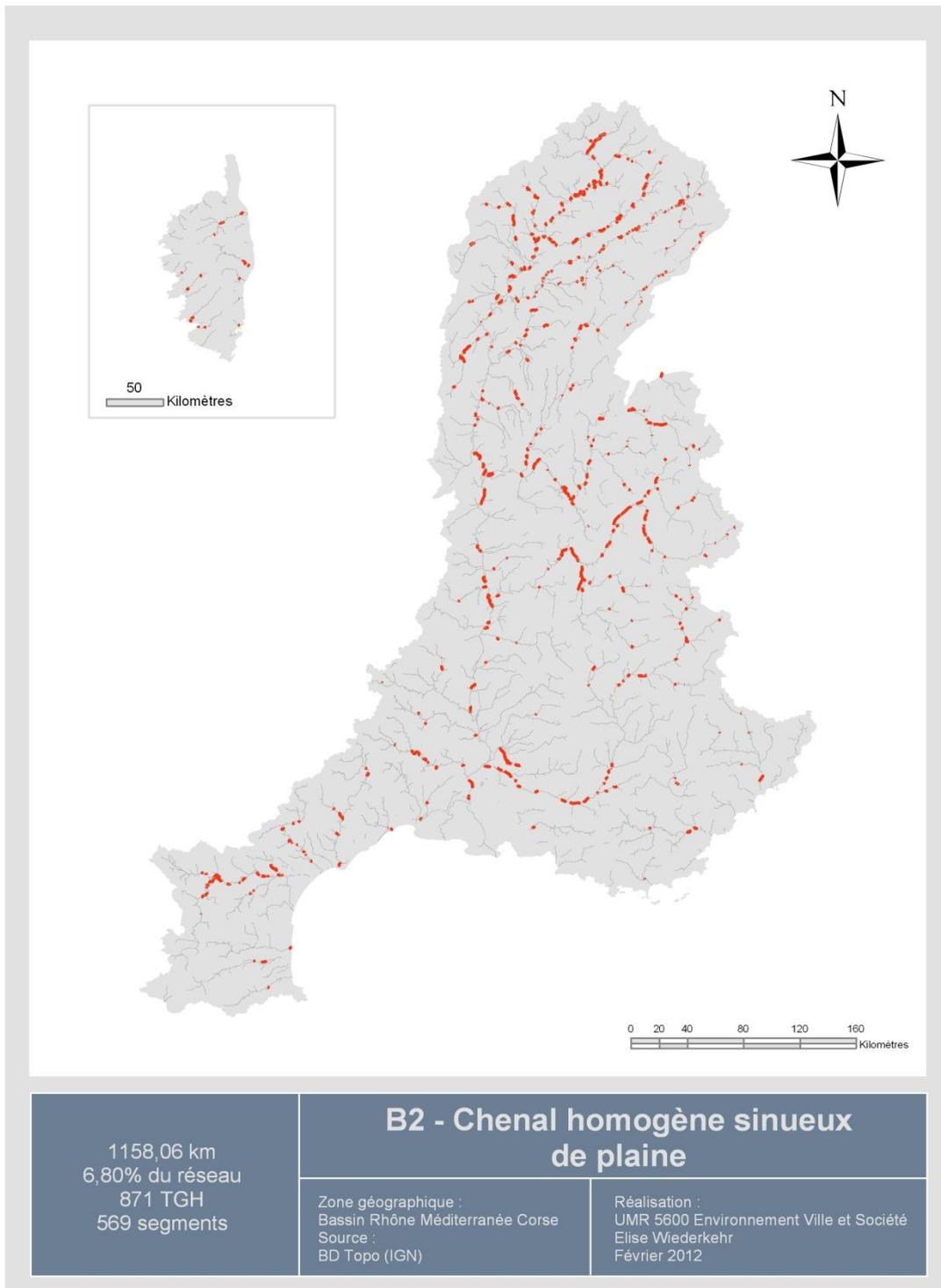


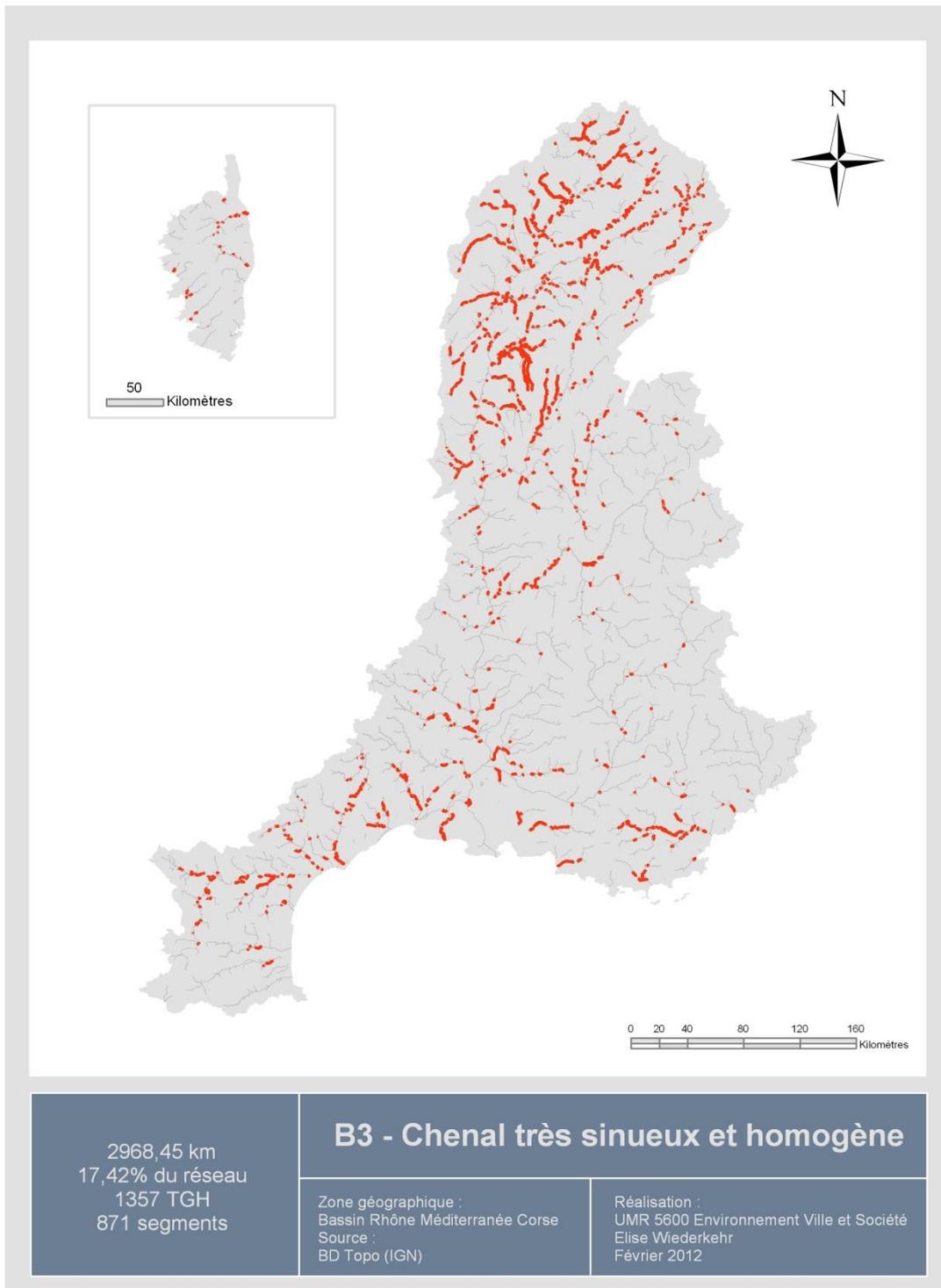


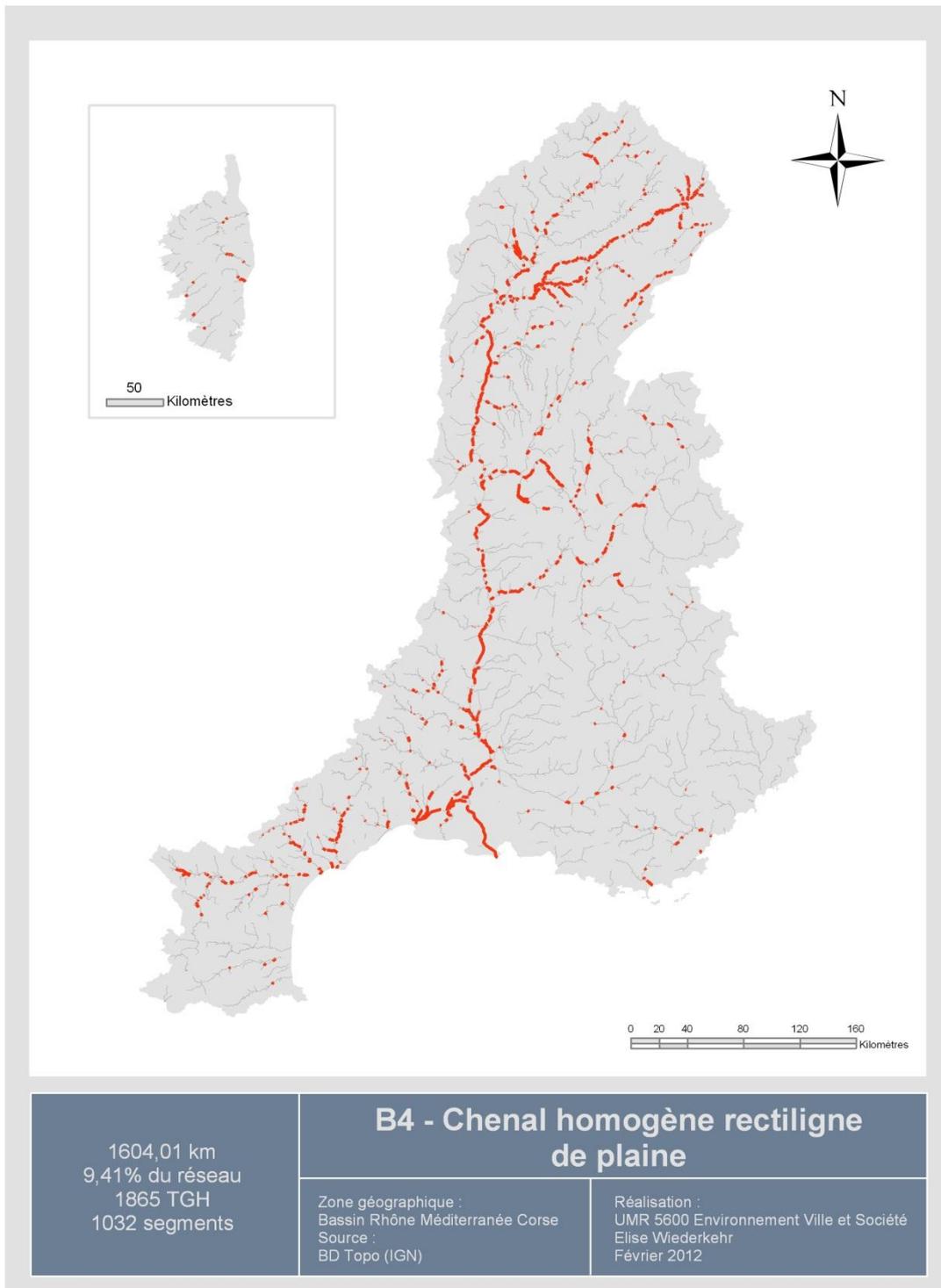


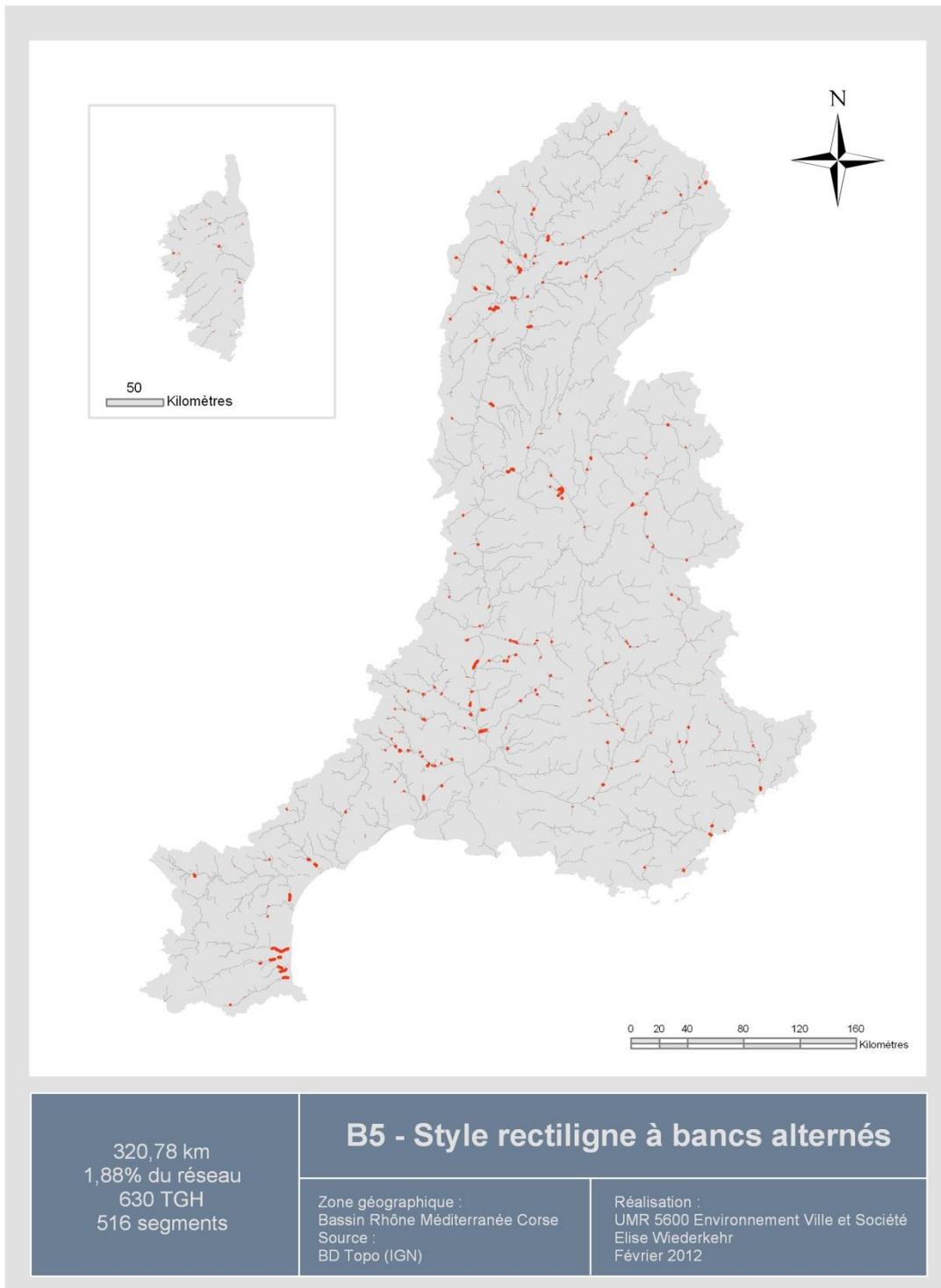


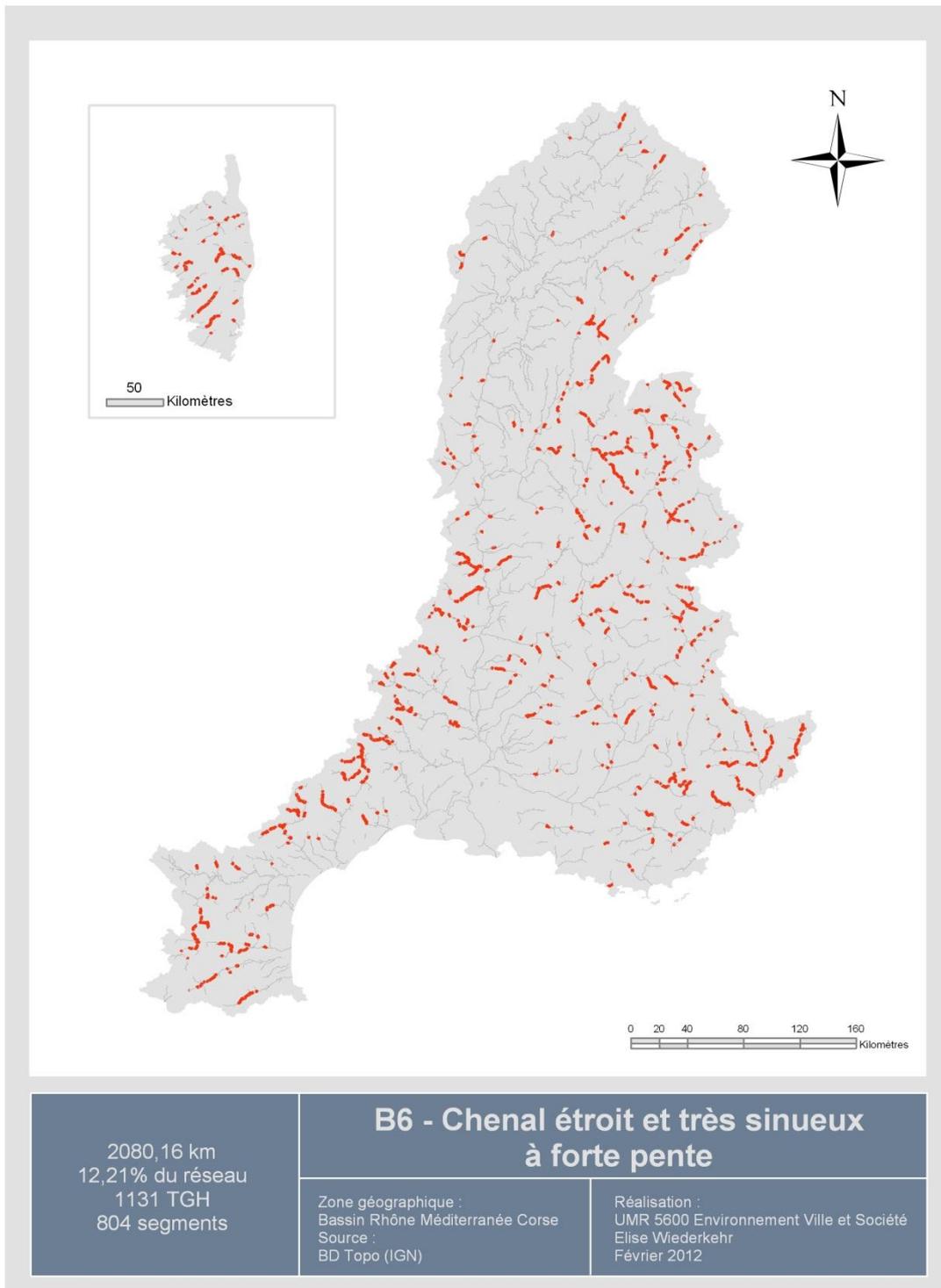


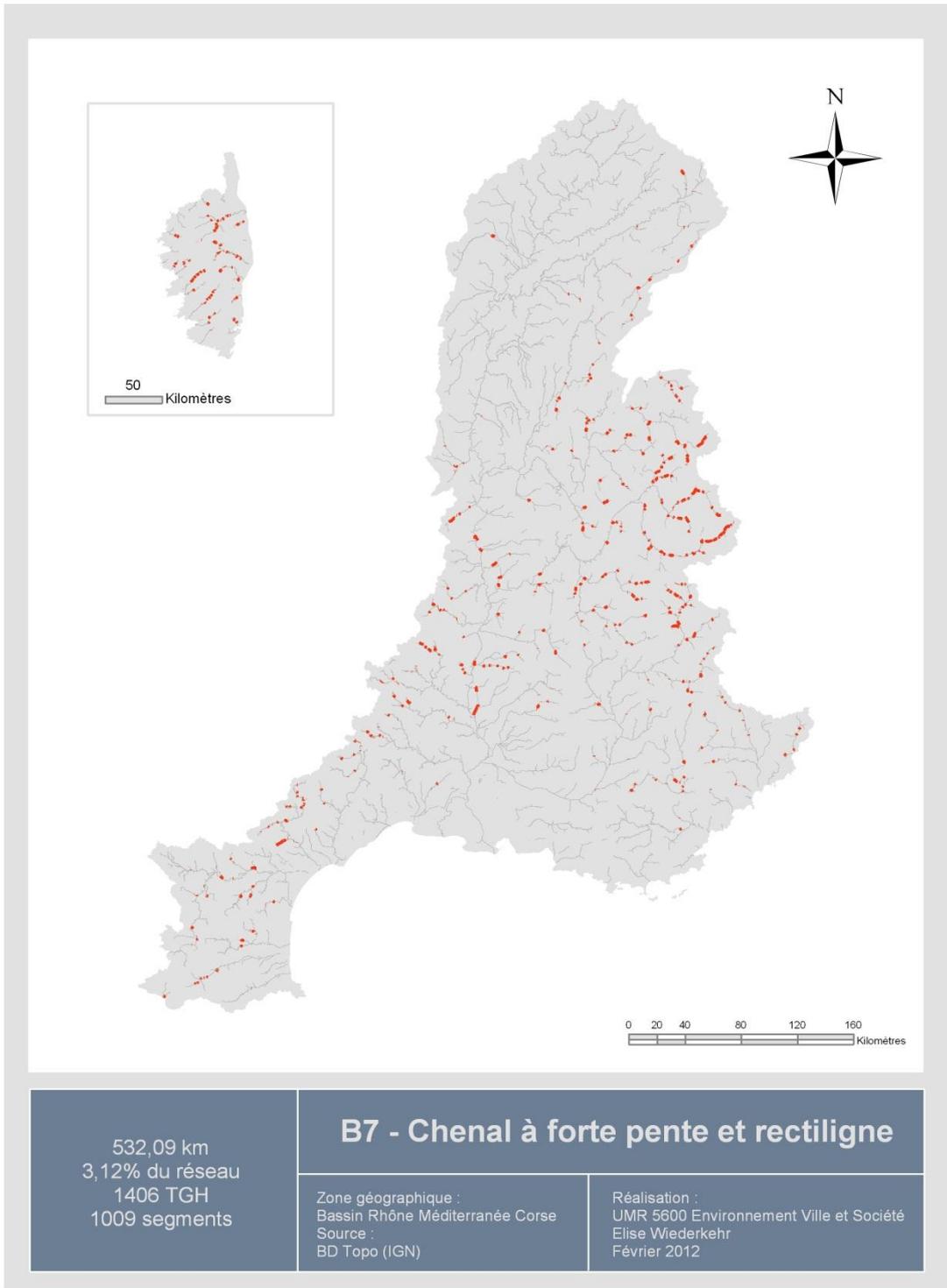


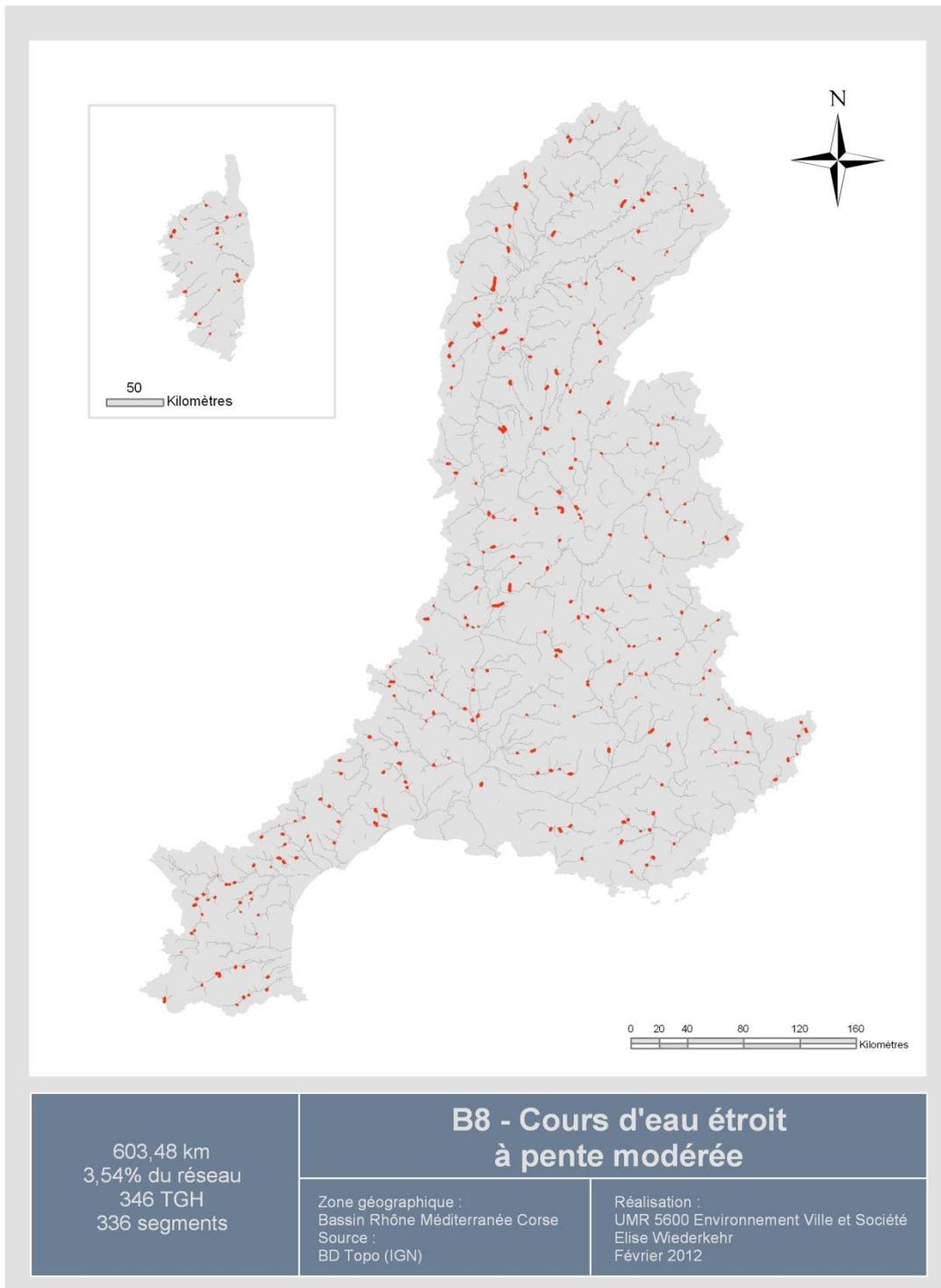


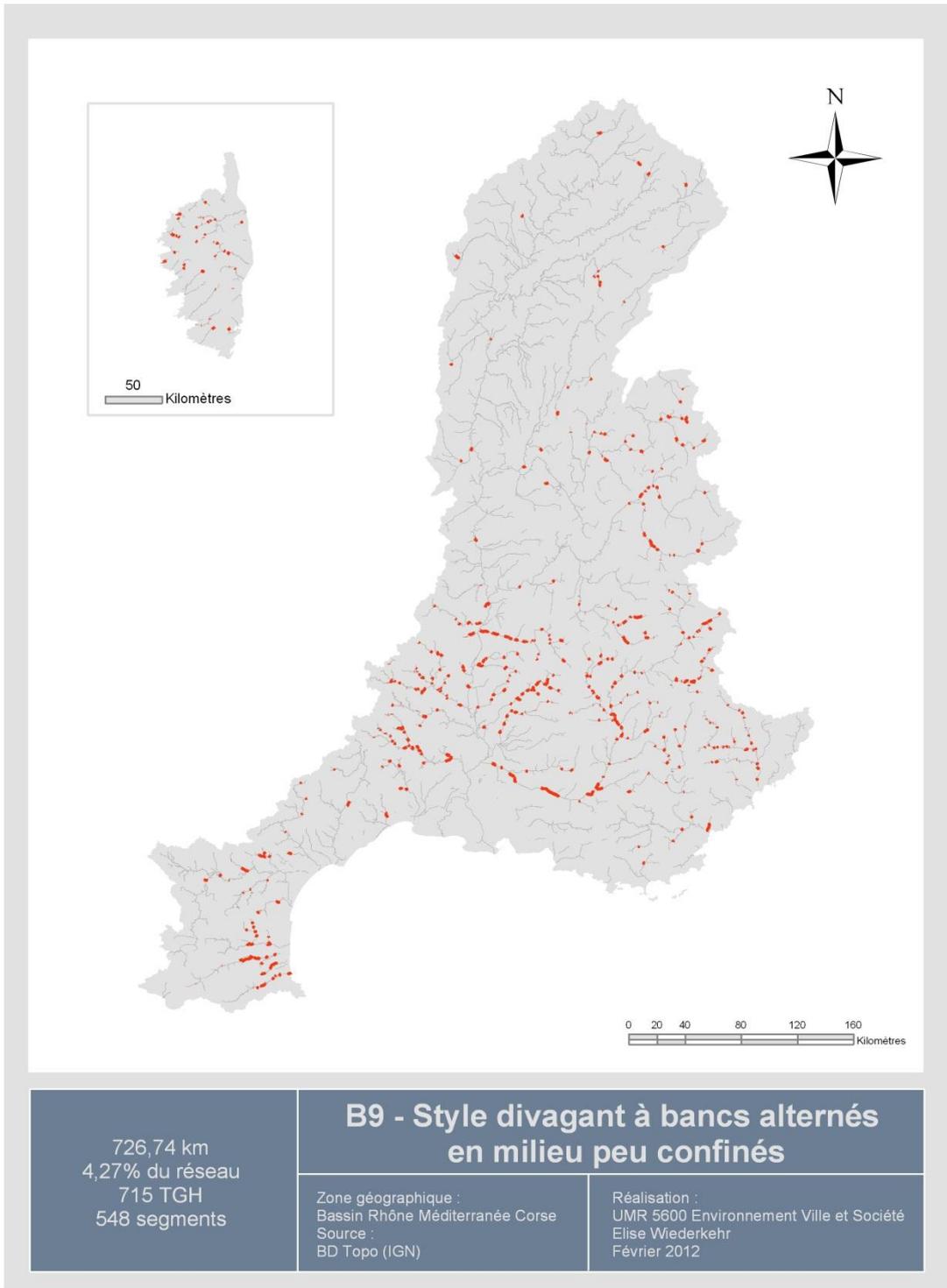


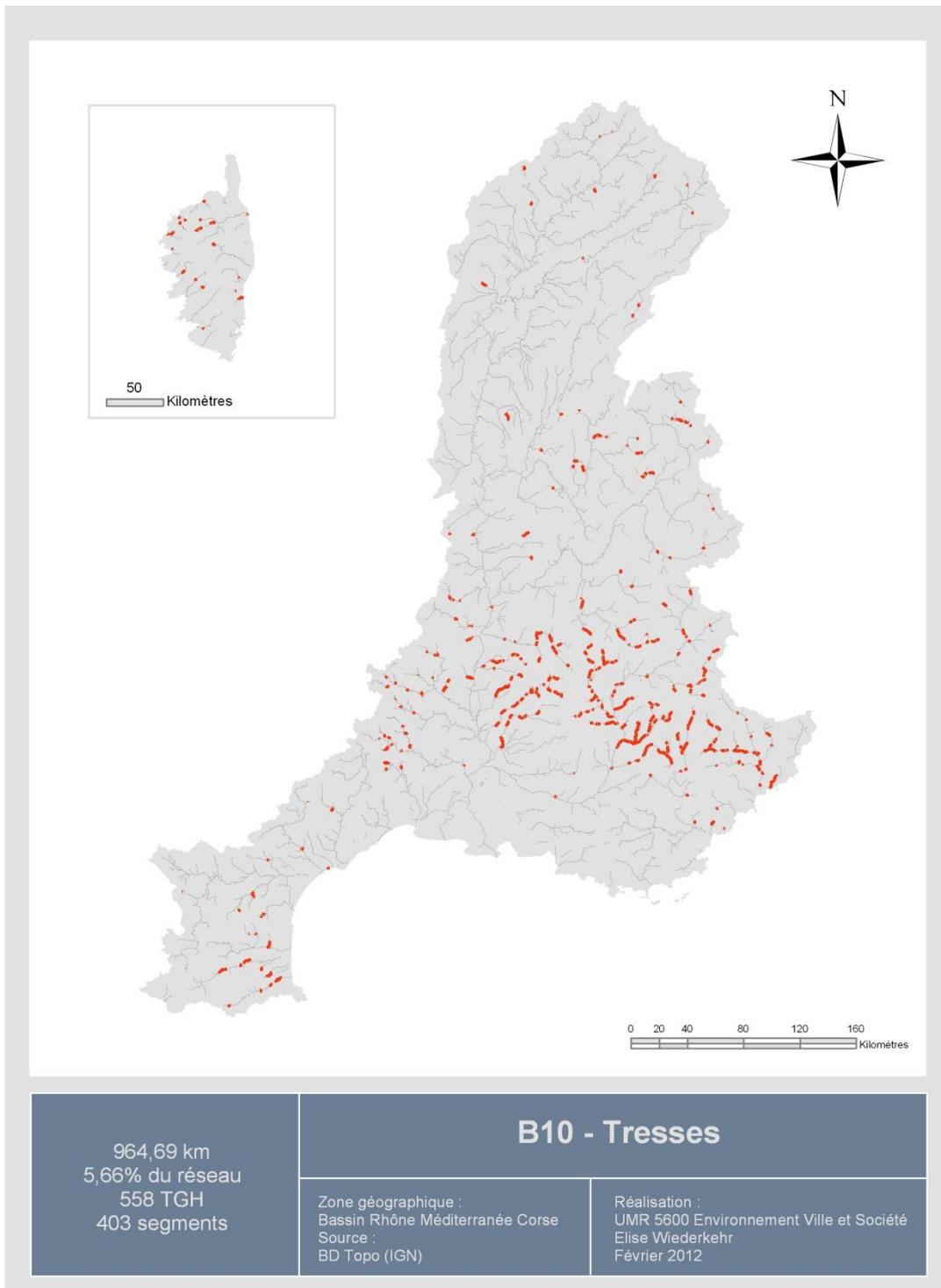


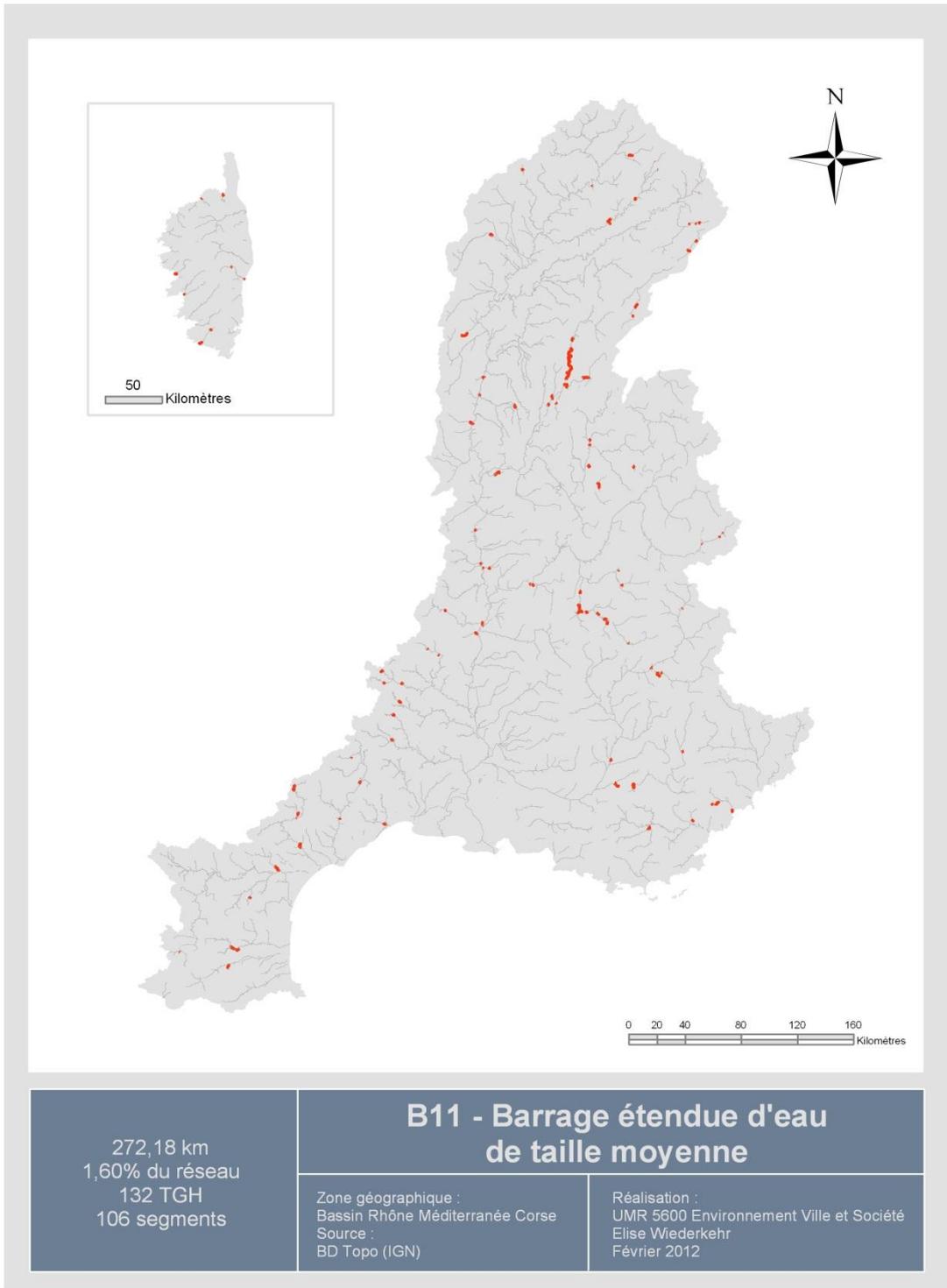


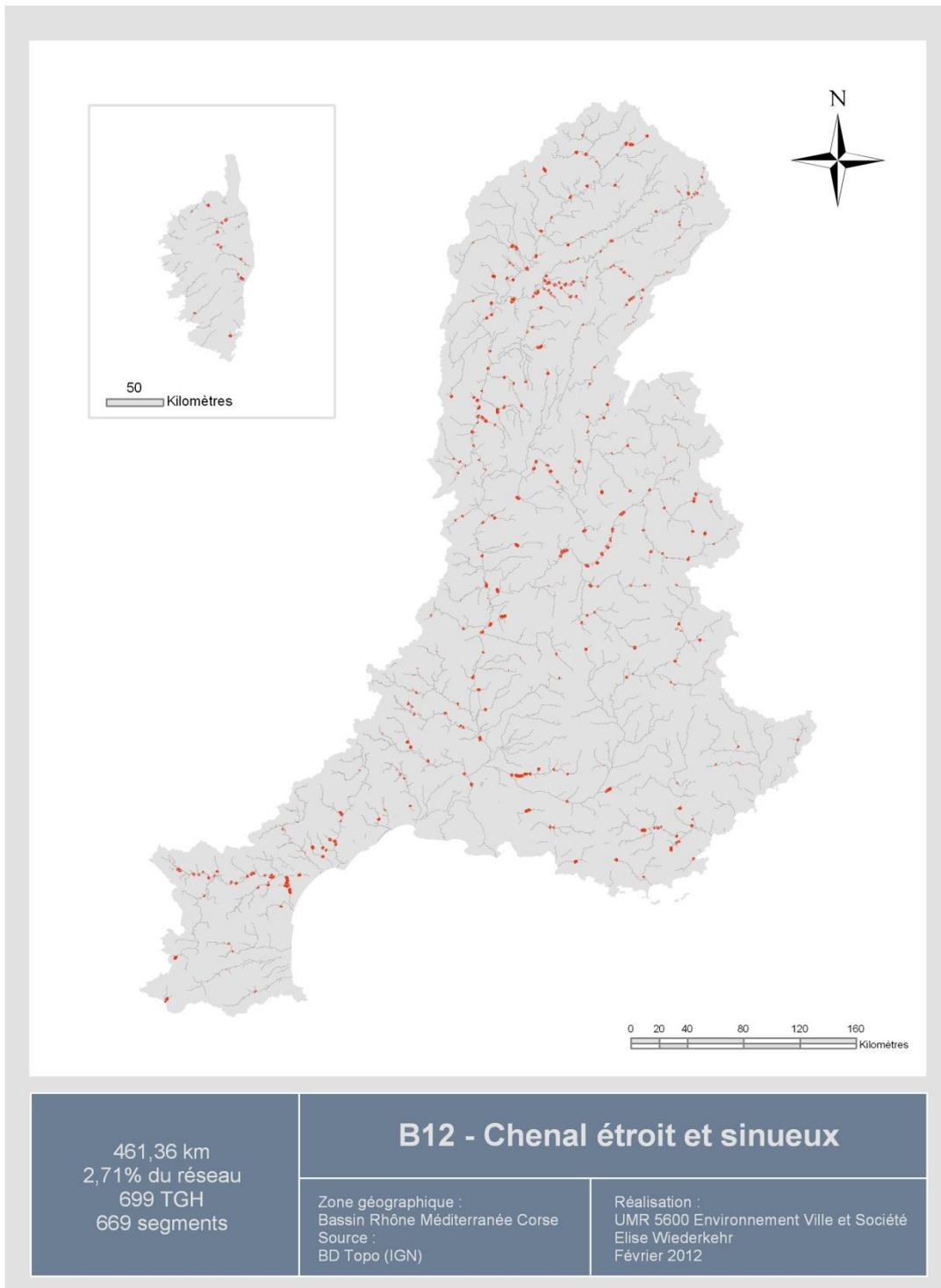


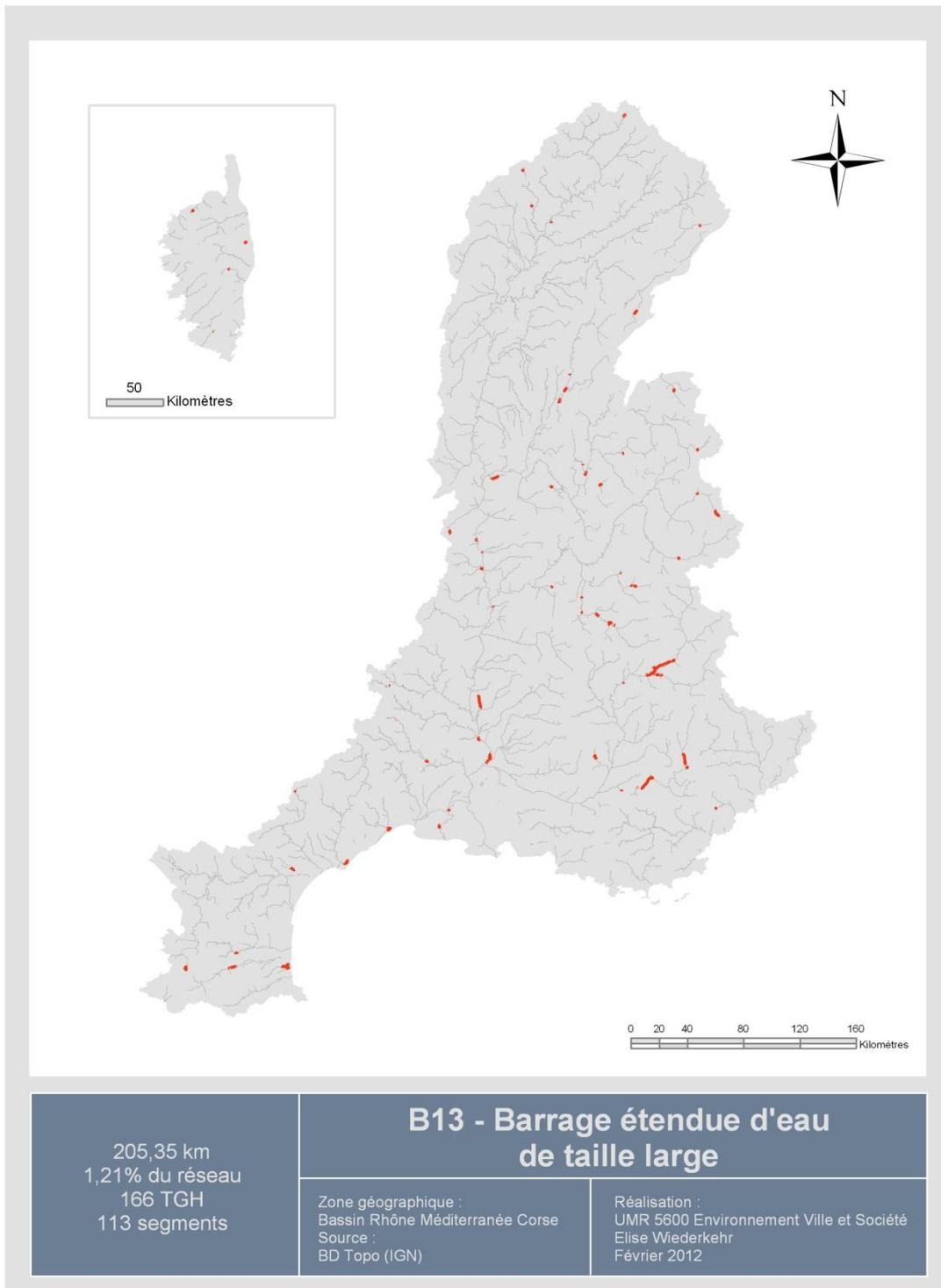


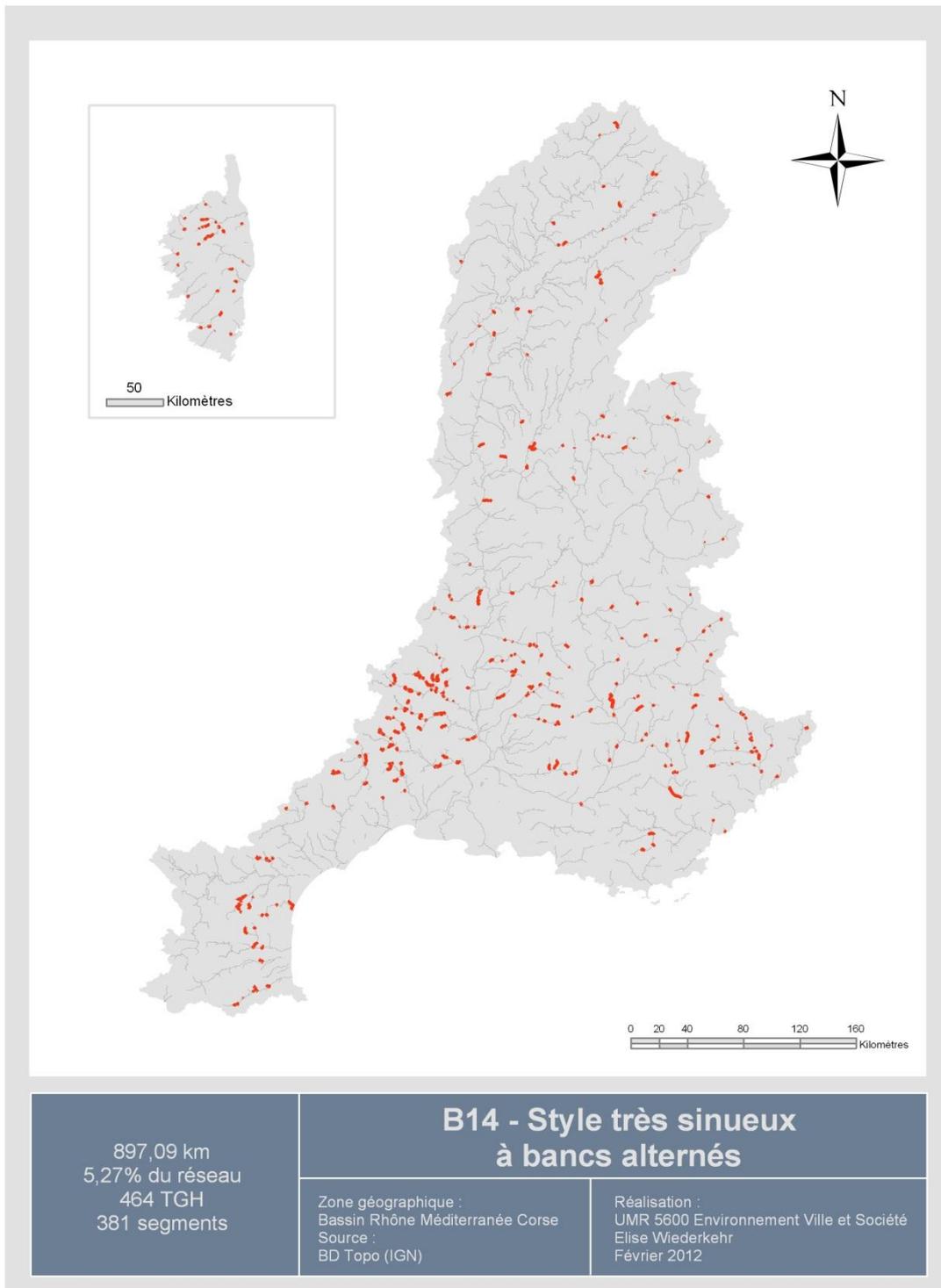












3. CARTES DES DEBITS ET PUISSANCE BRUTE

