Les bassins versants sensibles aux "crues rapides" dans le Bassin Parisien - Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes

Johnny Douvinet

▶ **To cite this version:**

Johnny Douvinet. Les bassins versants sensibles aux "crues rapides" dans le Bassin Parisien - Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Géographie. Université de Caen, 2008. Français. NNT : . tel-00344612

HAL Id: tel-00344612

https://theses.hal.science/tel-00344612

Submitted on 5 Dec 2008

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.

UNIVERSITÉ de CAEN / BASSE-NORMANDIE

U.F.R. de GEOGRAPHIE

ECOLE DOCTORALE ED68 - Littératures, Cultures et Sciences Sociales

Laboratoire GEOPHEN - LETG UMR 6554
GEOgraphie PHysique et ENvironnement

THESE

présentée par

M. Johnny Douvinet

et soutenue publiquement le **2 décembre 2008**

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ DE CAEN / BASSE-NORMANDE
Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

(Arrêté du 7 août 2006)

Les bassins versants sensibles aux « *crues rapides* » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes

MEMBRES du JURY

Mme Léna Sanders	**Directrice de Recherche, UMR 8504 CNRS, Université Paris 1 *(Rapporteur)***
M. Gilles Arnaud-Fassetta	**Maître de Conférences – HDR, Université Paris 7 - Denis Diderot *(Rapporteur)***
Mme Jeannine Corbonnois	**Professeur des Universités, Université du Maine *(Examinatrice)***
M. Patrice Langlois	**Maître de Conférences – HDR, Université de Rouen *(Examinateur)***
M. Yves Le Bissonnais	**Directeur de Recherche, UMR INRA 1221 LISAH, Montpellier *(Examinateur)***
M. Daniel Delahaye	**Professeur des Universités, Université de Caen BN *(Directeur de thèse)***

UNIVERSITÉ de CAEN / BASSE-NORMANDIE

U.F.R. de GEOGRAPHIE

ECOLE DOCTORALE ED68 - Littératures, Cultures et Sciences Sociales

Laboratoire GEOPHEN – LETG UMR 6554 – CNRS
GEOgraphie PHysique et ENvironnement

THESE

présentée par

M. Johnny Douvinet

et soutenue publiquement le **2 décembre 2008**

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ DE CAEN / BASSE-NORMANDIE
Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

(Arrêté du 7 août 2006)

Les bassins versants sensibles aux « *crues rapides* » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes

MEMBRES du JURY

Mme Léna Sanders	**Directrice de Recherche, UMR 8504 CNRS, Géographie-cités *(Rapporteur)***
M. Gilles Arnaud-Fassetta	**Maître de Conférences – HDR, Université Paris 7 – Diderot *(Rapporteur)***
Mme Jeannine Corbonnois	**Professeur des Universités, Université du Maine *(Examinatrice)***
M. Patrice Langlois	**Maître de Conférences – HDR, Université de Rouen *(Examinateur)***
M. Yves Le Bissonnais	**Directeur de Recherche, UMR INRA 1221 LISAH, Montpellier *(Examinateur)***
M. Daniel Delahaye	**Professeur des Universités, Université de Caen BN *(Directeur de thèse)***

Sommaire

3

Remerciements..... 5

Résumé / Abstract..... 9

Introduction générale..... **11**

Première partie
DES « *CRUES RAPIDES* » EN PERIODES PRINTANIERE ET ESTIVALE DANS LE NORD DE LA FRANCE – CONSTATS ET BESOINS DE RECHERCHE..... **21**

Introduction..... 22
Chapitre 1 – Présentation des phénomènes et éléments de définition..... 23
Chapitre 2 – Les dossiers « *CatNat* » comme supports d'analyse pour un inventaire des « *crues rapides* » 51
Chapitre 3 – Le risque « *crues rapides* » dans le nord de la France: contexte et état des lieux..... 73
Synthèse de la première partie..... 97

Deuxième partie
SEUILS DE DECLENCHEMENT ET FACTEURS DE PREDISPOSITION AUX « *CRUES RAPIDES* » **99**

Introduction..... 100
Chapitre 4 – Episodes pluvieux et types de circulations à l'origine des « *crues rapides* » (1983-2005)..... 101
Chapitre 5 – Caractéristiques morphologiques et portraits types de bassins sensibles 133
Chapitre 6 – Influence de l'occupation du sol sur la sensibilité des bassins touchés..... 157
Synthèse de la deuxième partie..... 185

Troisième partie
VERS UNE MESURE DYNAMIQUE DE L'INFLUENCE DE LA MORPHOLOGIE **187**

Introduction..... 188
Chapitre 7 – Les indices morphométriques à l'épreuve du temps 189
Chapitre 8 – Un automate cellulaire (« *RuiCells* ») pour simuler l'influence de la morphologie sur les écoulements de surface : développements méthodologiques..... 219
Chapitre 9 – Influence des structures spatiales sur la dynamique hydrologique: émergences et jeux d'échelles 241
Synthèse de la troisième partie..... 265

Quatrième partie
VERS UNE CARTOGRAPHIE DES ESPACES « *SENSIBLES* »..... **267**

Introduction..... 268
Chapitre 10 – Vers une meilleure prise en compte des interactions dans le fonctionnement des hydrosystèmes 269
Chapitre 11 – Spatialisation des zones « *à risque* » à différentes échelles : essai de cartographie 291
Synthèse de la quatrième partie..... 309

Conclusion générale **311**

Références bibliographiques **319**

Annexes 339

Liste des figures, tableaux et annexes..... 369

Table des matières 377

Remerciements

Expression personnelle d'interactions nombreuses, ce manuscrit est l'aboutissement de quatre années de recherche menées au laboratoire de *GEOgraphie PHysique en ENvironnement (*GEOPHEN*)* à l'Université de Caen Basse-Normandie. Qu'il me soit permis ici d'exprimer toute ma gratitude et une profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui m'ont apporté, de près ou de loin, soutiens et conseils tout au long de ce travail.

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de thèse, **Daniel Delahaye**, Professeur des Universités à l'Université de Caen, qui a toujours été présent au cours de ces quatre années. Ses précieux conseils, ses relectures et sa disponibilité, ont été une grande source d'encouragements, d'inspirations et de motivations à tout instant. Je le remercie de m'avoir associé au programme de recherche SYMBAD.

Je voudrais également remercier **Patrice Langlois**, Maître de Conférences / HDR à l'Université de Rouen, pour ses conseils et les développements apportés à l'automate *RuiCells* pour répondre à nos problématiques géomorphologiques et hydrologiques.

Je remercie **Léna Sanders**, Directrice de recherche à l'UMR 8504 CNRS, Géographie-Cités (Paris 1), et **Gilles Arnaud-Fassetta**, Maître de Conférences/HDR à l'Université Paris- Diderot (Paris 7), qui me font l'honneur d'être **rapporteurs** de cette thèse. Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à **Jeannine Corbonnois**, Professeur des Universités à l'Université du Mans, et à **Yves Le Bissonnais**, Directeur de recherche à l'UMR INRA 1221 LISAH (Montpellier), de compléter ce jury et d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je voudrais ensuite remercier les personnes qui ont contribué à financer ces recherches doctorales. Cette thèse a été financée par le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Nationale pendant trois ans dans le cadre d'une ACI (Action Concertée Incitative) *« Systèmes Complexes en SHS »* (2004-2007) Ce projet, intitulé *« Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes : les bassins versants sensibles aux* « crues rapides » *dans le nord de la France »*, a permis de définir les bases théoriques et méthodologiques préalables à ce travail. Je tiens à remercier *Gérard Weisbuch*, Directeur des programmes, d'avoir accepté de financer un tel projet. Deux demi-postes d'ATER (Allocataire Temporaire d'Enseignement et de Recherche), le premier à l'Université de Caen (2007-2008), le second à l'Université de Paris 1 (2008-2009), ont également contribué à financer ces travaux.

Cette recherche n'aurait finalement pu aboutir sans la collaboration de nombreuses personnes qui m'ont toutes apporté une aide précieuse. En essayant de n'oublier personne, je voudrais ici exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude :

► à Laurent Lespez et Jean-Michel Cador (GEOPHEN) pour m'avoir initié à l'érosion, aux transferts sédimentaires sur un petit cours d'eau bas normand (*«si peu érosif soit-il»*), et surtout aux plaisirs de la recherche dans le cadre de la maîtrise ;

► à Marianne Font et Bernard Delcaillau rattachés au laboratoire M2C (*Morpho-dynamiques Côtières et Continentales*, Université de Caen BN) pour leur précieux conseils et avis en début de thèse ;

► à Marie Vernay (MEDD, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable) pour les échanges dans le cadre de la réalisation du *Plan de Prévention des Risques (PPR) sur les crues torrentielles du sud de la France* (2005) ;

► à François Derancourt (Chambre d'Agriculture du Pas-de-Calais), à Pierre Mortreux (Chambre d'Agriculture de l'Aisne), à Bruno Ludwig (Bureau d'Etudes Sorange), à François Léonard (INRA, Laon), à Laurent Fleutry (Mission Erosion, Chambre d'Agriculture de l'Aisne), à Jean-François Ouvry (Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols, AREAS), à Michel Luce (Chambre d'Agriculture de la Somme) et à Joël Damay (Bureau d'études Emergence) pour les discussions à propos des différents programmes d'aménagements en cours ou finalisées ;

► à Fanny Cam (stagiaire archiviste à la DDSC, Direction de la Défense et Sécurité Civile), à François Giustiniani (ex-chargé de la Mission Patrimoine au sein du Ministère de la Culture), à Marie-Paule Couteron, Anne Laure Pierret, Jean-Claude Hermet, Gilles Barsacq, Hélène Delmas et Hervé Adeux (Ministère de l'Intérieur), à Pauline Moirez (CAC, Centre des Archives Contemporaines) et à Arnaud de Castelbajac (Mission des Archives Nationales), sans qui l'accès aux dossiers *« CatNat »* n'aurait pas été possible. Un grand remerciement pour leur gentillesse et les heures qu'ils ont passées à chercher les « *précieux* » cartons (les *dimabs*) nécessaires à la réalisation de l'inventaire des « *crues rapides* » ;

► à Karine Dobel (Préfecture de l'Oise), à Anne Lemoine (Préfecture du Calvados), à Catherine Degorre (Préfecture de la Seine-Maritime), à Laurence Douchin (Préfecture de l'Eure), à Isabelle Michaux (Préfecture de l'Aisne), à Laurence Guillaume (Préfecture du Nord) et Marie-Bernadette Masset (Préfecture du Pas-de-Calais) pour la consultation des archives conservées au sein des services de la sécurité civile (SIDPC, SIRACED-PC) des différentes Préfectures ;

► à François Mazurier (Secteur Seine-Aval de l'AESN, Agence de l'Eau Basse-Normandie), à Frédéric Bassien (AESN, Nanterre), à William Guérin et à Sylvain Victor (Agence de l'Eau Artois-Picardie), et à Cédric Ansard (Conseil Régional de Picardie), pour la mise à disposition des IGN © SCAN 25. Je tiens également à remercier André-Jean Pouille (Conseil Général du Nord-Pas-de-Calais) pour l'acquisition des données SIGALE et Jérémy Fleurisson (Conseil Régional de Haute-Normandie) pour la mise à disposition de la couche d'information *« Zones bâties »* issue de la base de données IGN © BD TOPO ;

► à Frédéric Amblard (Informaticien à l'IRIT, Toulouse) et à tous les membres du groupe SMASHS (*Simulations Multi-Agents en Sciences Humaines et Sociales*) pour les nombreux échanges sur les outils de modélisation conçus ou en cours de développement suite à l'Ecole thématique de Porquerolles (2006) ;

► à Olivier Planchon (COSTEL, Rennes 2) et à Olivier Cantat (GEOPHEN) pour leur disponibilité et leur collaboration dans l'interprétation des hauteurs d'eau quotidiennes, ainsi que pour leurs regards éclairés sur l'analyse des types de circulations atmosphériques. J'exprime aussi ma sincère gratitude à Frédéric Lefebvre (étudiant Master 1) qui a contribué aux analyses statistiques et sans doute à la phase la plus ingrate du traitement de données ;

► à Joël Darroussin (INRA, Orléans) pour la mise à disposition des données spatialisées sur l'aléa érosion des sols (données INFOSOL, 2001) ;

Je voudrais également remercier les différentes personnes avec lesquelles j'ai discuté des résultats obtenus dans le cadre de la thèse, notamment Marco Van De Wiel (Ontario, Canada), Richard Pike (USGS, Etats-Unis), Christophe Cudennec (AgroCampus, Rennes, France) et Tom Coulthard (Exeter, Angleterre) au cours de divers colloques et à travers différentes réunions. Merci à Jean-Philippe Malet, désormais rattaché au laboratoire IMFS (*Institut de Mécanique des Fluides et Solides*, Strasbourg) d'avoir relu plusieurs articles et d'avoir pris du temps pour commencer une comparaison de nos résultats avec d'autres approches.

Je souhaite aussi remercier tous les collègues que j'ai côtoyés durant ces quatre années de thèse, en particulier Claire Lang, Louise Purdue, Hervé Quénol, Florian Tolle, pour leur soutien, ainsi que la communauté des jeunes géomorphologues et des géographes quantitativistes.

Que les étudiants du Master Géographie à l'Université de Caen BN (Master Recherche et Master AGIRE, *Aménagement et Gestion Intégrée des Ressources Environnementales*), qui ont participé à plusieurs sorties « *terrain* », trouvent ici mes plus sincères remerciements. Un grand merci notamment à *Mathieu Bernard* et à *Antoine Guilleux* pour leur aide sur le terrain, et à *Anthony Gallay, à Jean-Charles Lemay* et à *Grégory Martin*. Une pensée pour le personnel administratif de l'UFR de Géographie, à l'Université de Caen BN, et aux bibliothécaires (surtout Nico) pour leur aide à tout instant. Merci aussi à Josette Marie pour les corrections d'orthographe apportées à ce travail.

Un grand merci aux « *jeunes géophéniens* » pour les bons moments partagés à l'heure des cafés, des apéros (et pas uniquement !) : Estelle, Aurélie, Yann, Elise, Philippe, Marie-Anne, Max, Candide, Seb, Vincent, Aline… La bonne ambiance et les discussions entre les doctorants, les ingénieurs, les maîtres de conférences et les professeurs, ont contribué à une véritable vie de groupe au sein du laboratoire. Qu'il me soit ainsi permis de remercier Daniel, Laurent, Stéphane, Bob, Patrick , David, Anne-Julia …

J'exprime également mes remerciements les plus chaleureux aux amis qui m'ont toujours soutenu pendant ces longues années d'études, notamment Anthony, Jean, Elo, Laetitia, Aline ; Miké, Delphine, Tonton, Anne-Lise, Mika, Sonia, Cédric, CriCri, Alix, Marie, Hervé, Mathilde ; Cécile, Olive, Sophie, Max, Céline, Jean-Luc, Hélène, Greg, Claire ; Séb, Aurélien, Sophie, Yohann, Zoé, Jess, Gwen, Lydie, Dédé ; Lulu, Ben, Cam…

Enfin, je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements à ma famille, à mes parents et à mon frère jumeau *Greg* en particulier, qui ont toujours été là quand j'avais besoin d'eux... Leur présence à mes côtés et leurs constants encouragements ont permis de créer les conditions bénéfiques à un travail de rédaction serein au cours des derniers mois. Je ne saurais jamais assez remercier mes parents de m'avoir tant poussé à suivre les études ; ils n'avaient sans doute pas imaginé un parcours aussi long !

Résumé

En raison de leur caractère torrentiel, les « *crues rapides* » qui apparaissent en périodes printanière et estivale dans les régions du nord de la France constituent aujourd'hui la forme la plus originale et la plus dangereuse des inondations rencontrées dans ces régions. Le poids des activités humaines dans le fonctionnement de ces crises hydrologiques est incontestable. Ces crues turbides prennent naissance sur des territoires agricoles où les espaces cultivés ne cessent de se développer. L'urbanisation croissante et la place du réseau routier dans les axes majeurs d'écoulement aggravent la rapidité des flux et la vulnérabilité des biens et des personnes. Afin d'améliorer la connaissance sur ces événements, un inventaire a été réalisé à partir des dossiers « *CatNat* ». L'approche comparative menée sur les 189 bassins versants recensés (1983-2005) a permis de faire ressortir l'influence de la morphologie à différentes échelles. La vitesse de concentration de l'écoulement rapide est principalement liée à la combinaison entre le système de pentes, l'organisation des réseaux de talwegs et la forme des bassins versants. Il n'existait cependant aucune méthode permettant de mesurer, de manière synthétique et continue, le rôle de cette composante sur la dynamique hydrologique d'un bassin versant. Les approches quantitatives se sont limitées à des mesures séparées des composantes morphologiques (indices de compacité, rapport de confluence d'Horton, courbe hypsométrique…). En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes, et en particulier sur les automates cellulaires, il a été possible de développer des méthodes permettant de quantifier l'efficacité de la structuration en trois dimensions du « *bassin versant* ». L'adaptation de ces nouvelles méthodes d'analyse spatiale, encore peu employées en géomorphologie, nécessitera une réflexion sur la validité des outils et la pertinence des résultats en réintégrant progressivement les autres variables de l'hydrosystème. Tous ces résultats aboutissent à la réalisation de différentes cartes de sensibilité dans ces régions du nord de la France.

Mots-clés (indexation Rameau) *:*
Inondations -- Parisien, Bassin (nord ; France) – Géomorphologie – Risques naturels – Cartes – Automates cellulaires – Systématique – Thèses et écrits académiques.

Mots-clés (indexation libre) :
Crues rapides -- Bassin Parisien – Morphologie -- Automates cellulaires -- Systèmes Complexes.

Abstract

"*Flash floods*" occurring on the loamy plateaux of the Paris Basin, in the north of France, are the most original and dangerous form of floods encountered in this area because of their torrential nature. The human impact on these events is indisputable as they usually originate in agricultural ploughed areas. The increasing urbanization as well as the road network located in the thalweg of the valleys leads to faster water flows and a higher vulnerability of societies. To better assess occurrence of these events, watersheds have been located thanks to the French *CatNat* data base. The morphological organization of the watershed between forms, slopes and drainage networks, plays a key role on the "*flash floods*" dynamics and on the water flow concentration along pathways. Therefore, the traditional quantitative methods usually describe separately each morphological component (index of compacity of Gravelius, Horton ratio ordination, longitudinal profile section, hypsometric curve, etc), and none of them enables to estimate, in a synthetic and dynamic ways, the influence of the spatial organization of those three morphological component. Based on the complex systems theory, it is now possible to measure the 3D organization of the catchment area. The methodological implications of this work are very relevant as the tools involved were not currently used by geomorphologists or hydrologists at the beginning of this research. The results obtained and the validity of these spatial analysis methods will have to be discussed at the end of this work, progressively integrating other variables in simulations. All these results encourage maps of sensibility in these areas.

Keywords (Rameau indexing):
Floods – Parisien, Bassin (nord; France) – Geomorphology – Natural risks – Maps – Cellular Automata – System analysis – Dissertations, Academic.

Keywords (free indexing):
Flash floods -- Paris Basin -- Catchment morphology -- Cellular Automata -- Complex Systems.

Introduction générale

Chéret (02) – 17 juin 1986
Source : dossiers « *CatNat* »

Depuis deux décennies, les **catastrophes** liées à l'eau semblent de plus en plus fréquentes dans les **régions du nord de la France** (Bassin Parisien). Les aléas hydrologiques y prennent différentes formes, dont il est possible de dresser une typologie rapide :

- les débordements de cours d'eau affectent les grands bassins versants, notamment celui de la Seine. Ces phénomènes, les plus classiques, se déclenchent à la suite de longues pluies hivernales qui contribuent à la saturation des sols et des formations superficielles ;

- les remontées (ou débordements de nappes) ont certes un caractère événementiel, mais elles sont surtout liées à la pluviométrie annuelle, voire pluriannuelle, qui peut entretenir un niveau piézométrique élevé (la Somme en 2001) ;

- les *« coulées de boue»*, également appelées *« crues turbides »*, affectent des petits bassins versants ne présentant pas toujours d'écoulement pérenne (des *« vallons secs »*).

Cette recherche s'intéresse plus spécifiquement aux *« coulées de boue »* qui, en raison de leur caractère torrentiel, constituent la forme la plus **originale** et la plus **dangereuse** des inondations rencontrées dans ces régions. Ces phénomènes sont de plus en plus nombreux et les dommages induits par ces écoulements sont régulièrement évoqués dans la littérature scientifique (Angeliaume, 1996 ; Merle *et al.*, 2001 ; Delahaye, 2002 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002).

► Contexte scientifique

Toutes les recherches abordant le thème des *« coulées de boue »* considèrent qu'il s'agit avant tout d'une manifestation exacerbée du ruissellement érosif (Boiffin *et al.,* 1988 ; Dufour *et al.*, 1990 ; Papy et Douyer, 1991 ; Ludwig, 1992 ; Auzet *et al.*, 1995, 2005 ; Le Bissonnais *et al.*, 1996, 2002 ; Ludwig *et al.,* 1996 ; Angeliaume et Wicherek, 1997 ; MATE, 2001). La **filiation** avec l'érosion des sols est plus qu'**évidente** car les sols fournissent l'intégralité des matériaux alimentant la turbidité des eaux de crues (Massei *et al.,* 2003).

Les inondations liées à du ruissellement érosif ne sont pas des phénomènes nouveaux dans ces régions. Ainsi, F. Lefèvre en souligne l'existence en Picardie dès 1959. Le Comité d'Aménagement Rural (CAR) de la Canche et de l'Authie démontre, dès 1978, à quel point le Val de Canche est sensible à ce type d'événement. Le début des années 1970 est marqué par une recrudescence des phénomènes (Douay, 1980 ; Bolline, 1982). Les traces d'érosion des sols sont spectaculaires dans le Nord-Pas-de-Calais où elles se manifestent sous la forme d'inondations répétées de villages, comme à Longuenesse, près de Saint-Omer, ou à Ecuires, à proximité de Montreuil (Masson, 1987). De la même manière, E. Meyer (2001) observe que parmi les onze coulées boueuses majeures enregistrées depuis la seconde guerre mondiale sur le bassin versant de Sannerville (Mantois), sept sont postérieures à 1980. Cette évolution a aussi été observée dans la Somme (Devaud, 1995). En Haute-Normandie, les événements répétés depuis le milieu des années 90 ont entraîné des dégâts coûteux, voire des pertes en vies humaines : trois personnes sont décédées à Saint-Martin-de-Boscherville (76) le 16 juin 1997, et deux à Barentin et à St-Léonard (76) en mai 2000 (Delahaye *et al.*, 2007).

Les mutations agricoles ont rapidement été les premières incriminées. En 1986, Maucorps montre comment les remembrements ont provoqué l'agrandissement de la surface moyenne des parcelles, passant de 1 ha à 4 ou 5 ha. Parallèlement, l'occupation du sol s'est modifiée, comme par exemple dans l'Artois où les surfaces labourées représentent aujourd'hui plus de 90 % de la SAU (Surface Agricole Utile). Les effets semblent endémiques : F.X Masson (1987) a observé une augmentation de la turbidité des eaux en lien avec la disparition des surfaces enherbées et boisées. E. Meyer (2001) montre comment la modification du paysage agricole a profondément accentué la recrudescence d'inondations boueuses depuis les années 1990.

Deux types de phénomènes, dont le mode de fonctionnement est différent, peuvent être différenciés. Dans une étude portant sur la Seine-Maritime, D. Delahaye (2002) oppose ainsi les **crues turbides hivernales** (appelées « *coulées de boue* »), et **les crues printanières et estivales** (que l'on distinguera ici par le terme « *crues rapides* »).

Les crues turbides hivernales sont liées à de longues pluies peu intenses. L'apparition d'une catastrophe nécessite la présence de vastes impluviums permettant la concentration d'un volume de ruissellement important. Ces crues vont prendre naissance en amont des grands bassins versants (fig. 1.), zone où les bassins élémentaires se développent largement sur le plateau. Sur ces bassins très fortement cultivés, le fonctionnement du ruissellement est chronique. Tous les travaux expérimentaux ont montré des **manifestations quasi annuelles du ruissellement érosif**. Pour passer de ces écoulements locaux à un phénomène de crue, il faut atteindre un cumul pluviométrique très important. Quand le seuil est atteint (entre 60 et 90 mm sur une décade, dont 15 mm le dernier jour), le système de ruissellement change d'échelle (Papy *et al.*, 1988 ; Papy et Douyer, 1991). Le fonctionnement conjugué de plusieurs bassins élémentaires (jusqu'à l'ordre 5) va permettre de mobiliser un volume d'eau suffisant pour former une « *coulée de boue* ».

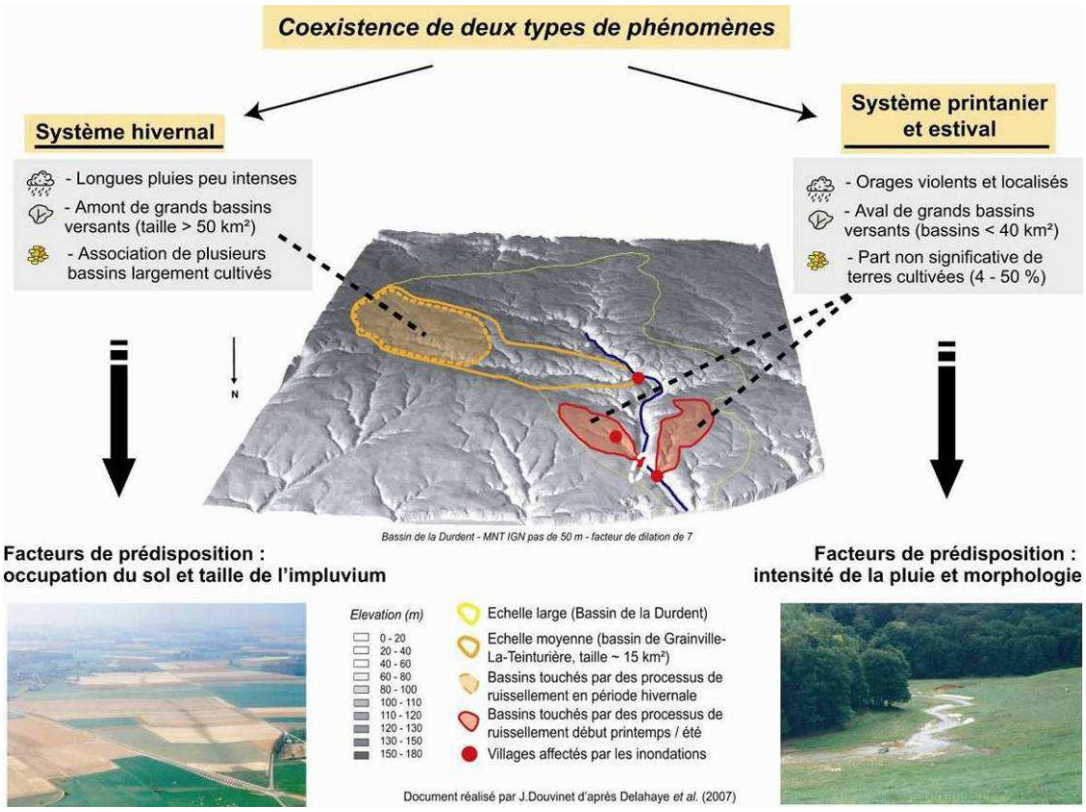


Fig. 1. Deux modes de fonctionnement distincts en Seine-Maritime (Delahaye *et al.*, 2007).

Dans ce cas-là, l'incidence de l'occupation du sol est patente. Le sol des terres cultivées n'étant pas protégé, il se dégrade sous l'effet de la pluie cumulée et sa capacité d'infiltration chute rapidement. Au-delà d'un certain seuil, la croûte de battance recouvre la majeure partie des surfaces limoneuses (Boiffin *et al.*, 1988). Le moindre épisode pluvieux peut alors engendrer des écoulements boueux importants. Plus les surfaces sont dégradées et plus les aires contributives sont vastes, plus le potentiel de ruissellement augmente.

Les événements printaniers liés à de fortes pluies, de nature orageuse le plus souvent, constituent le second type d'événements couramment rencontré dans ces régions (Boardman *et al.*, 2003 ; Evrard *et al.*, 2007). Les processus sont totalement différents des précédents. La pluie est intense et précédée de décades souvent peu humides. En corollaire, l'écoulement est **torrentiel et violent.** L'intensité des pluies dépasse rapidement la capacité d'infiltration des sols et le ruissellement formé constitue la principale source d'alimentation possible de la crue. Le comportement des surfaces est moins subtil que dans les cas précédents. L'ensemble des observations de terrain réalisées à la suite de phénomènes récents montre l'importance de la densité du couvert végétal et le rôle de la localisation des surfaces sensibles au ruissellement. La rapidité de la réponse hydrologique des bassins (leur réactivité) est un point fondamental car l'orage est en général localisé et de courte durée**.** Il n'est surtout pas nécessaire de réunir de vastes surfaces contributives, contrairement aux processus hivernaux.

► Problématique de recherche

Ces observations vont dans le sens de la coexistence de ces deux systèmes, déconnectés dans le temps et dans l'espace, même si les événements printaniers et estivaux ne sont pas totalement indépendants de la pluviométrie hivernale (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Le système hivernal, peu sensible à l'effet de la pente, est surtout régulé par des facteurs pédologiques et culturaux. Il affecte les grands bassins en pente douce et largement cultivés, en formant un réseau ravinaire conséquent (Hauchard, 2001 ; Delahaye, 2002 ; Gaillard, 2004).

Dans le cas des phénomènes printaniers et estivaux, le lien avec la densité de surfaces cultivées est moins évident (Delahaye et Hauchard, 1998 ; Hauchard *et al.*, 2002). Plusieurs travaux confirment que l'apparition d'une catastrophe ne serait pas simplement due à une manifestation paroxysmique du ruissellement érosif. Les surfaces ruisselantes ne sont pas les plus nombreuses dans certains bassins versants : 22 % de terres cultivées dans le bassin de Saint-Martin-de-Boscheville (crue du 16 juin 1997) ; 60 % de prairies et bois dans les bassins en amont de Trouville-Deauville (crue du 1er juin 2003) ; seulement 19 % de terres cultivées dans le bassin de Petit-Appeville (crue du 28 juin 2005, Douvinet *et al.*, 2006a).

Pour activer le système printanier et estival, il faut des pluies violentes qui redonnent à la morphologie un rôle majeur. **A priori, ce n'est donc plus l'organisation de l'occupation du sol qui importe, mais l'organisation des formes au sein des bassins versants.**

Dans la plupart des recherches menées jusqu'à présent, l'entrée centrée sur la sensibilité du sol et sur l'évolution de l'occupation du sol a été privilégiée (Meyer, 2001 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002). Les composantes morphologiques, hydrogéologiques et climatiques ont été peu étudiées en raison de l'apparente **monotonie** du relief et de la trompeuse **douceur** du climat océanique réputé sans extrêmes. Les variables géomorphologiques étant jugées **invariantes**, la genèse de ces crues, alimentées par du ruissellement érosif, ne pouvait s'expliquer que par la nature du sol, son occupation et les pratiques agricoles.

Dans ce travail, il ne s'agit donc pas de minimiser les conséquences des transformations de l'agriculture sur le fonctionnement hydrologique des bassins, mais plutôt de **réintroduire certaines composantes de l'hydrosystème dont le rôle a été trop souvent minoré.** Le poids des activités humaines dans le fonctionnement de ces catastrophes est incontestable puisque ces crues prennent naissance sur des territoires agricoles où les espaces cultivés ne cessent de se développer. L'urbanisation croissante et la place du réseau routier dans les axes majeurs des écoulements aggravent l'exposition des biens et des personnes.

Sans minorer le poids des sociétés, plusieurs études (Delahaye *et al.*, 2001 ; Hauchard *et al.*, 1999, 2002) ont montré que d'autres facteurs explicatifs pouvaient également intervenir, soulignant notamment l'importance de la structuration interne des bassins versants dans le fonctionnement des « *crues rapides* »**.** Apparaissant à la suite de fortes pluies, la vitesse de concentration de l'écoulement rapide serait ainsi principalement liée à la combinaison entre le système de pentes, l'organisation des réseaux de talwegs et la forme des bassins versants. Cette combinaison spatiale construit l'unité physique « *bassin versant* » qu'on peut finalement considérer comme un véritable « *système spatial complexe* » (Delahaye, 2005).

L'objectif de la thèse consistera alors à étudier l'influence de la morphologie dans le fonctionnement des « *crues rapides* », qui apparaissent en périodes printanière et estivale, et à mettre en oeuvre des méthodes permettant de mesurer l'influence de cette composante sur la dynamique des écoulements de surface. Ces travaux seront poursuivis en intégrant peu à peu les autres variables du système (physiques et humaines).

► Orientations méthodologiques

Il n'existe, cependant, aucune méthode permettant de mesurer, de manière synthétique et continue dans l'espace, l'incidence de la morphologie sur la dynamique hydrologique d'un bassin versant. Les approches quantitatives se sont toujours limitées à des mesures séparées des variables morphologiques (indices de compacité, rapport de confluence d'Horton, courbe hypsométrique…). Chaque indice, s'il est étudié indépendamment des autres, ne suffit pas à répondre à nos objectifs et cette approche, « *cloisonnée* », limite considérablement l'intérêt des résultats si on veut mesurer le rôle de la morphologie dans sa globalité.

En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes et sur l'utilisation des automates cellulaires, il est envisagé de développer des méthodes permettant de quantifier l'efficacité de la structure en trois dimensions d'un « *bassin versant* ». Cette orientation méthodologique a été facilitée par le financement du projet nommé SYMBAD, une Action Concertée Incitative (ACI) **« *Systèmes Complexes en SHS (Sciences Humaines et Sociales)* »** (2004-2007), intitulée « *Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes : les bassins versants sensibles aux « crues rapides » du nord de la France* », dans lequel s'inscrit ce travail de thèse.

Dans le cadre d'études antérieures, un automate cellulaire (*RuiCells)* a déjà été développé pour la simulation des phénomènes de ruissellement érosif au sein de petits bassins versants (Delahaye *et al.*, 2001 ; Langlois et Delahaye, 2002 ; Gaillard, 2005 ; Gaillard *et al.*, 2008 ; base de modèles sur Libergéo). L'automate permet d'associer un maillage triangulaire, plus précis pour la simulation des écoulements de surface (Crave et Davy, 2001 ; Mita *et al.*, 2001), à une base de données spatialisées sous SIG (Système d'Information Géographique). Un des objets de cette thèse est de savoir si cet automate peut également être utilisé pour répondre à nos problématiques, notamment pour mesurer les effets de la morphologie.

Dérivés de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD), les automates cellulaires sont encore peu utilisés en géomorphologie. **Si les applications sont pionnières en géographie sociale et humaine (O'Sullivan, 2001 ; Torrens et Benenson, 2005), elles sont novatrices en géographie physique et environnementale.** De nombreux articles sont néanmoins parus depuis quelques années, et les problématiques ayant recours aux automates cellulaires sont très diversifiées :

- dégradations liées à des processus érosifs (Favis-Mortlock, 1998 ; Valette *et al*, 2006) ;
- modélisation des écoulements fluides à partir de particules d'eau (Drogoul, 1995) ;
- écoulements de lave (Di Gregorio *et al.*, 1998 ; D'Ambrosio *et al*, 2003; Avolio *et al.*, 2006) ;
- processus hydrologiques et sédimentaires en section canalisée (Murray et Paola, 1994) ;
- érosions de berges, influence du méandrage (Coulthard et Van de Wiel, 2006) ;
- propagation des dunes sableuses (Thomas et Nicholas, 2007) ;
- remplissage sédimentaire des vallées depuis l'Holocène (Van de Wiel *et al.*, 2007) ;
- évolution du littoral dans le cadre du projet CEMCOS (Dearing *et al.*, 2005) …

Le foisonnement des automates cellulaires dans le domaine de la géographie physique et environnementale souligne l'intérêt porté à cet outil d'analyse spatiale. Ces méthodes offrent surtout un double avantage : répondre à des questions sur lesquelles les *« méthodes classiques et traditionnelles »* achoppent (Lewin, 1994 ; Dauphiné, 2003 ; Angotti, 2004), et s'investir dans un champ **pluridisciplinaire**, où les contributions des uns (les informaticiens) permettent de répondre aux problématiques des autres (les thématiciens), et vice-versa (Coulthard *et al.*, 2000 ; Sanders, 2001 ; Allen *et al.*, 2005 ; Ménard *et al.*, 2005).

► Choix de la zone d'étude

La partie nord du Bassin Parisien constitue un site d'étude adapté pour cette thématique de recherche (fig. 2.). Les *« crues rapides »* sont fréquemment observées dans le Pays de Caux (Douyer, 1987, 1999 ; Delahaye, 2002) et leur existence est aussi attestée dans d'autres régions agricoles : le Vexin normand (Derville, 1994 ; Meyer, 2001), le Soissonnais (Angeliaume, 1996, Emergence, 2003), l'Artois (Rur'eaux, 1994 ; Devaux, 1995 ; DRAF, 1998 ; Gauvin, 2000). Ces phénomènes ne sont d'ailleurs pas spécifiques au nord de la France car certains chercheurs y font aussi référence dans d'autres milieux sédimentaires : la plaine de l'Alsace et l'est de la France (Auzet *et al.*, 1995, 2005) ; la Wallonie et le centre de la Belgique (Beuselink *et al.*, 2000 ; Evrard *et al.*, 2007) ; le Sussex, au sud de l'Angleterre (Boardman, 2003).

L'espace d'étude se limite ici à **huit départements** (Calvados, Seine-Maritime, Eure, Oise, Somme, Nord, Pas-de-Calais, Aisne). Ce choix se justifie par la volonté de travailler dans un espace (régions de plateaux) homogène d'un point de vue géologique (milieu sédimentaire), mais dans lequel plusieurs types de configurations (occupation du sol, climat, pentes, degré d'urbanisation, géomorphologie, etc.) sont possibles.

On est, en revanche, contraint par un découpage administratif inhérent à la nature des bases de données utilisées. Le recensement des inondations (base *« CatNat »*), la nature de l'occupation du sol (base *Corine Land Cover*) et les données du Recensement Général Agricole (RGA) existent à l'échelle départementale voire régionale. Une **approche régionale** doit aussi permettre d'avoir un échantillon d'événements suffisamment important pour pouvoir mener une analyse comparative sur les facteurs de déclenchement et de prédisposition.

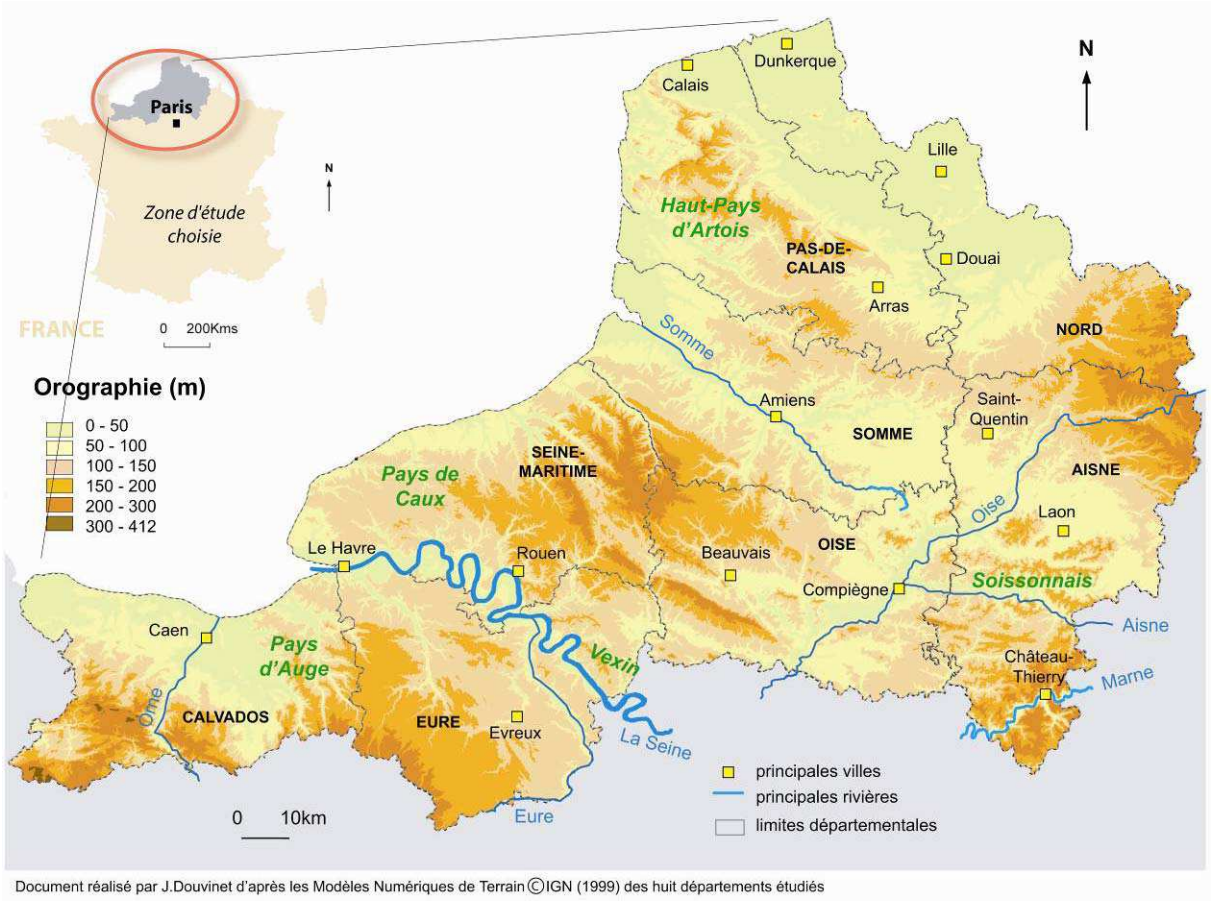


Fig. 2. Localisation de la zone d'étude.

► Définition des objectifs de recherche

Deux objectifs sont clairement dissociés. On veut, d'une part, **améliorer** les connaissances sur les phénomènes « *crues rapides* » qui apparaissent en périodes printanière et estivale dans le nord de la France, et d'autre part, **utiliser de nouvelles méthodes d'analyse spatiale pour étudier les relations entre la structuration interne d'un bassin et sa dynamique potentielle.** Ces résultats doivent permettre une meilleure spatialisation des espaces « *sensibles* » à ce type d'aléa hydrologique, et fournir, à moyen terme, les éléments de base pour la définition de systèmes d'alertes appropriés.

Différentes thématiques, aux objectifs spécifiques, seront alors abordées dans ce travail :

► **dresser un état des connaissances sur les catastrophes avérées.** A travers cet état des lieux, on souhaite **inventorier** les secteurs géographiques fréquemment touchés par des « *crues rapides* », **mettre à jour les traits communs** à tous ces événements, en **étudier la distribution** dans l'espace et dans le temps, **évaluer l'ampleur du risque** encouru par les populations locales, et discuter la **terminologie** utilisée pour désigner ces phénomènes qui apparaissent dans les régions du nord de la France.

► **identifier les facteurs de déclenchement (conditions climatiques) et les facteurs de prédisposition (conditions géomorphologiques et l'occupation du sol) qui contrôlent la dynamique des « *crues rapides* ».** Ces trois variables sont plus spécifiquement étudiées

pour répondre à un certain nombre de questions : l'analyse des pluies de forte intensité permet-elle d'identifier des seuils de pluie suffisamment représentatifs pour pouvoir être considérés comme des « *pluies extrêmes à risque* » ? Le portrait morphologique des bassins sensibles, établi par D. Delahaye (2002) pour les « *vallons secs* » de la Seine-Maritime, est-il transposable à l'ensemble de la zone étudiée ? L'organisation spatiale de l'occupation du sol joue-t-elle un rôle sur la sensibilité des bassins étudiés ? Existe-t-il un lien entre un pourcentage minimum de surfaces cultivées et l'apparition des crues ?

► **évaluer l'influence dynamique de la morphologie sur la genèse puis la diffusion des « *crues rapides* ».** Le système morphologique, perçu ici comme la combinaison spatiale entre la forme d'un bassin, ses pentes et l'organisation de son réseau hydrographique, a été analysé à travers des simulations numériques produites par un automate cellulaire. Le système proposé intègre progressivement les effets de formes, de réseaux et de pentes, pour mettre à jour le rôle séparé puis emboîté de chacune des composantes.

► **contribuer à une meilleure cartographie des espaces sensibles aux « *crues rapides* ».** Cette partie a pour objectif de démontrer en quoi l'analyse de la dynamique induite par la structure interne d'un bassin apporte des éléments de réponse sur le fonctionnement des hydrosystèmes. Les travaux à propos de l'organisation morphologique des bassins seront poursuivis en intégrant peu à peu d'autres variables (occupation du sol, pluie, zones bâties) qui peuvent modifier la réponse hydrologique du système bassin versant.

► Structuration de la thèse

La thèse se structure en **4 parties** qui respectent les étapes logiques de la réflexion qui a été menée ; elle se décline plus spécifiquement en **11 chapitres**.

Partie I : Les « *crues rapides* » en périodes printanière et estivale dans les régions du nord de la France : constats et besoins de recherche (pp. 21 – 98)

Le **premier chapitre** définit les principales caractéristiques des « *crues rapides* » et discute la terminologie couramment utilisée pour désigner ces phénomènes. Ce chapitre est illustré par quelques études de cas recensées dans la Seine-Maritime et le Calvados.

Le **deuxième chapitre** présente la méthode d'inventaire choisie pour localiser la totalité des « *crues rapides* » associées à des épisodes orageux dans huit départements du nord de la France. La base de données « *CatNat* » a servi de support car c'est la seule base de données qui recense les phénomènes inondants dommageables depuis 1983. Une démarche originale a cependant été conçue face aux nombreuses limites d'utilisation de la base « *CatNat* ».

Le **troisième chapitre** analyse plus spécifiquement la base de données, dresse un état des lieux sur le contexte et l'ampleur des dommages subis par la population et évalue finalement la distribution spatiale et temporelle des événements sur la période considérée.

Partie II : Seuils de déclenchement et facteurs de prédisposition (pp. 99 – 186)

Le **quatrième chapitre** examine les caractéristiques des épisodes pluvieux et des types de circulations atmosphériques à l'origine des « *crues rapides* » afin de connaître la variabilité spatiale des pluies de forte intensité, et fournir les bases nécessaires au développement d'un système de prévision de l'aléa pluviométrique approprié à ce type de risque.

Le **cinquième chapitre** se propose d'étudier plus finement la variable morphologique, de statuer ou non sur la spécificité morphométrique des bassins versants touchés par des « *crues rapides* », et de vérifier la plus forte prédisposition de certains secteurs géographiques.

Le **sixième chapitre** s'intéresse à l'occupation du sol à travers différentes échelles, à la fois à l'échelle régionale, puis à l'échelle globale des bassins versants, et enfin à une échelle événementielle en liant cette composante aux deux précédentes.

Partie III : Vers une mesure dynamique de l'influence de la morphologie (pp. 187 – 266)

Le **septième chapitre** dresse un bilan sur les indices morphométriques classiques et met à jour la pluralité des méthodes couramment utilisées en hydrologie pour mesurer l'incidence de la morphologie d'un bassin sur sa réponse hydrologique.

Le **huitième chapitre** définit la méthode choisie pour cette étude et présente les développements méthodologiques apportés tout en justifiant le recours aux automates cellulaires.

Le **neuvième chapitre** analyse plus finement les résultats des simulations proposées sur les bassins versants touchés par des *« crues rapides »*. Cette section met à jour les émergences et les jeux d'échelles à travers un va-et-vient entre les niveaux locaux et globaux.

Partie IV : Vers une cartographie des espaces « *sensibles* » (pp. 267 – 310)

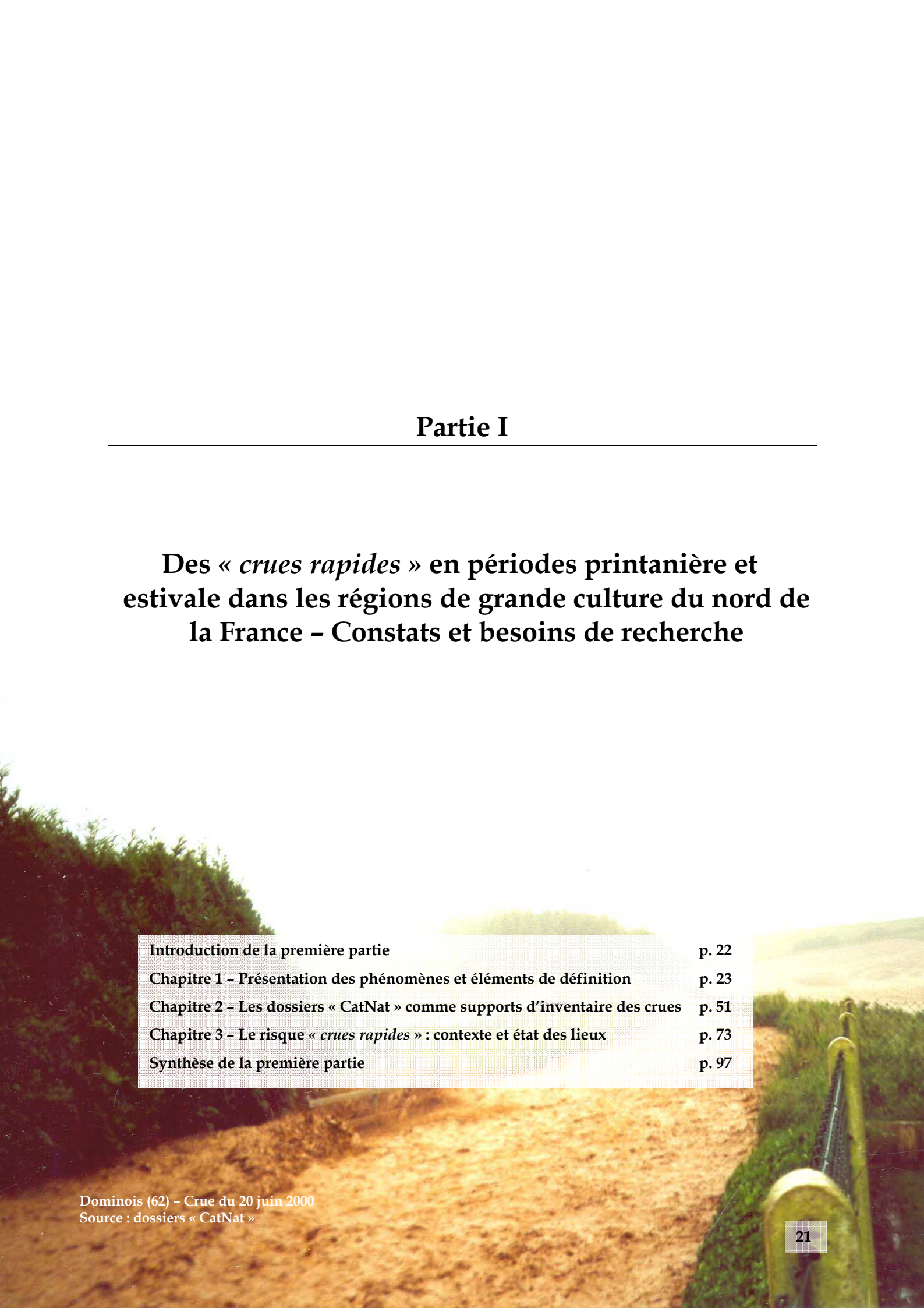
Le **dixième chapitre** propose d'intégrer progressivement dans les simulations les effets des autres composantes (pluie, occupation du sol) du système bassin versant. On peut ainsi mesurer la dynamique globale de l'hydrosystème, tout en évaluant les interactions entre ces composantes et la morphologie à travers différentes échelles spatiales.

Le **onzième chapitre** a pour objet la spatialisation des secteurs potentiellement à risque de « *crues rapides* » sur l'ensemble de la zone d'étude, en combinant les résultats obtenus par l'analyse de la structure interne des bassins avec l'implantation des zones bâties.

Partie I

Des « *crues rapides* » en périodes printanière et estivale dans les régions de grande culture du nord de la France – Constats et besoins de recherche

Introduction de la première partie	**p. 22**
Chapitre 1 – Présentation des phénomènes et éléments de définition	**p. 23**
Chapitre 2 – Les dossiers « CatNat » comme supports d'inventaire des crues	**p. 51**
Chapitre 3 – Le risque « *crues rapides* » : contexte et état des lieux	**p. 73**
Synthèse de la première partie	**p. 97**



Dominois (62) – Crue du 20 juin 2000
Source : dossiers « CatNat »

Introduction de la première partie

L'objectif de la première partie est de **dresser un état de l'art des connaissances actuelles sur les phénomènes de « *crues rapides* » affectant les plateaux du nord de la France** (Bassin Parisien) en périodes printanière et estivale. Ces « *crues rapides* », dont le trait commun est le transport d'un mélange concentré d'eau et de particules solides provenant de l'érosion des sols, constituent **la forme la plus originale des inondations rencontrées dans ces régions**.

Paradoxalement, si ces phénomènes semblent de plus en plus nombreux, et si les dégâts induits par ces écoulements rapides sont régulièrement évoqués dans la littérature (Merle *et al.*, 2001 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002 ; MEDD, 2005), très peu d'études ont été spécifiquement menées sur ce genre d'inondation (Angeliaume, 1996 ; Meyer, 2001 ; Delahaye, 1999, 2002). Il est d'ailleurs important de souligner que ces phénomènes passent au travers des typologies des inondations distinguées sur la partie septentrionale de la France, le terme « *crues rapides* » étant souvent réservé aux crues apparaissant sur le pourtour méditerranéen (Laganier *et al.*, 2000 ; Laganier, 2002 ; MEDD, 2005 ; MEDAD, 2006 ; Douvinet et Agasse, 2006). L'ambiguïté des termes utilisés pour désigner ces phénomènes (« *coulées boueuses* », « *coulées de boues* », « *crues turbides* ») traduit l'absence d'une définition claire et précise des processus associés.

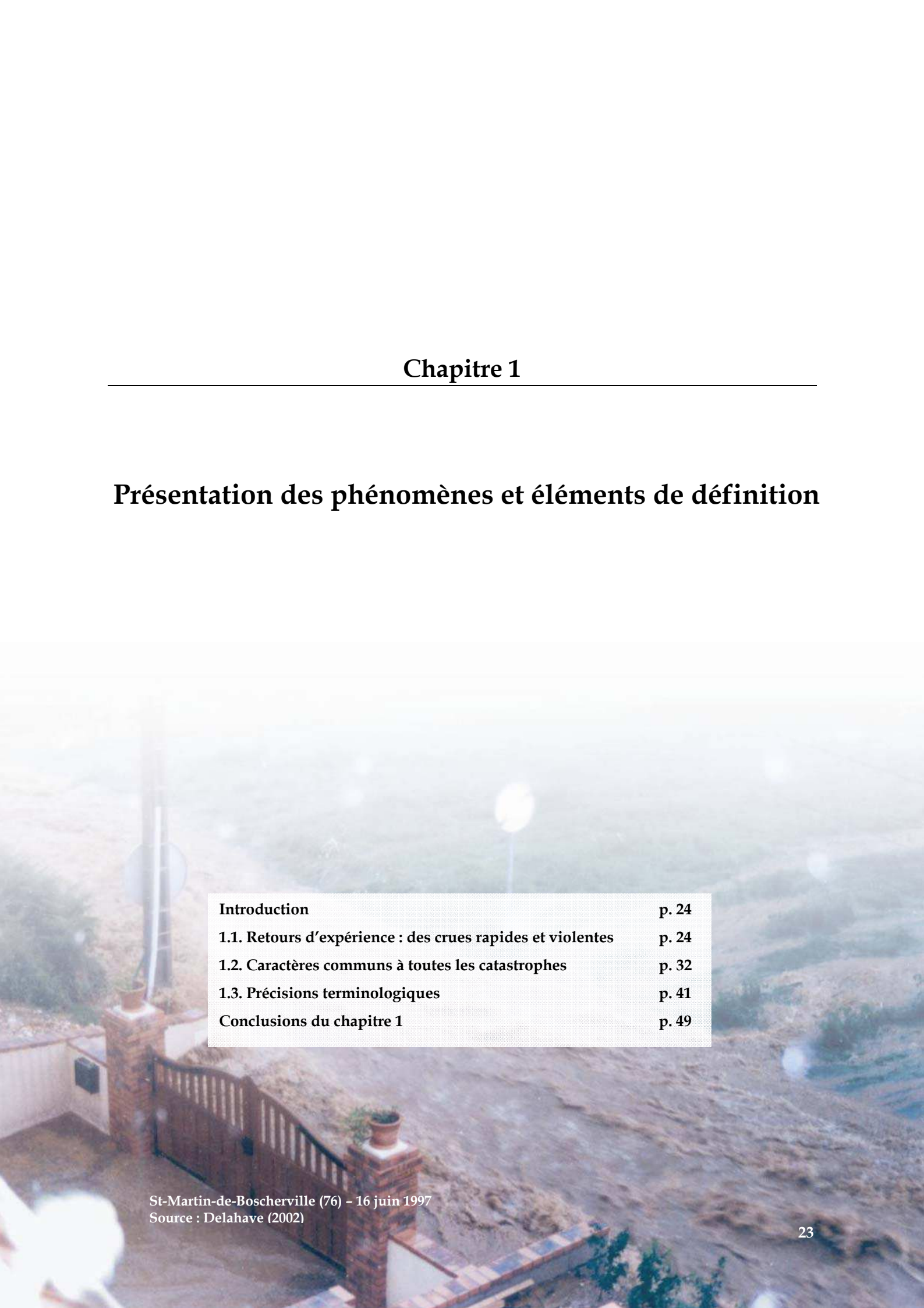
Ces crues constituent par ailleurs un **risque mal connu** par les scientifiques, la presse, les populations et les élus locaux. Ces phénomènes apparaissent la plupart du temps sur des « *vallons secs* », dépourvus d'écoulement pérenne, donc des bassins *a priori* non sujets à des inondations. Les études hydrologiques menées dans ces régions se sont toujours focalisées sur les inondations affectant les principales vallées humides (Laganier, 2002 ; Agasse, 2005). Les « *crues rapides* » se produisent également sur des **bassins versants non jaugés**, où il est d'autant plus difficile de mettre en place des réseaux de mesure puisque les phénomènes se produisent rarement aux mêmes endroits. « *Comment justifier dans ces vallons secs l'installation d'un réseau de mesure qui va enregistrer un événement tous les 10 à 20 ans avec une très forte probabilité d'être emporté sous l'effet de la violence du flot ?* » (Delahaye, 2002).

L'organisation de cette première partie respecte les étapes logiques de la réflexion qui a été menée. Elle part d'une présentation de quelques catastrophes avérées (**chapitre 1**), à un inventaire des « *crues rapides* » sur les vingt dernières années (**chapitre 2**), pour finir sur une analyse de la vulnérabilité des espaces touchés et sur une étude de la distribution dans le temps et dans l'espace de tous les événements recensés (**chapitre 3**).

Chapitre 1

Présentation des phénomènes et éléments de définition

Introduction	**p. 24**
1.1. Retours d'expérience : des crues rapides et violentes	**p. 24**
1.2. Caractères communs à toutes les catastrophes	**p. 32**
1.3. Précisions terminologiques	**p. 41**
Conclusions du chapitre 1	**p. 49**



St-Martin-de-Boscherville (76) – 16 juin 1997
Source : Delahave (2002)

Introduction

Les « *crues rapides* » apparaissant en périodes printanière et estivale dans les régions du nord de la France, se caractérisent par des **écoulements torrentiels fortement chargés en éléments solides provenant de l'érosion des sols.** Ce sont des événements hydrologiques rapides et violents qui se manifestent sur des petits bassins versants ruraux, dont l'une des particularités est de ne pas toujours présenter d'écoulement permanent.

Une bonne connaissance de ces événements est fondamentale si on souhaite améliorer la gestion de ce risque et mettre en place des techniques de prévision et de prévention auprès de la population. Pour pouvoir anticiper l'aléa, il faut acquérir le maximum d'informations le plus en amont possible de l'événement, connaître les données qui permettent de comprendre son apparition, et savoir à quel moment les seuils de déclenchement et de fonctionnement ont été dépassés (Gout, 1993). Afin de répondre à ces attentes, plusieurs événements ont été analysés sous l'angle des dommages matériels et humains qu'ils ont provoqués (§ 1.1.). Ainsi, dans un premier temps, on s'intéresse aux catastrophes avérées, observées, et non à la nature des variables explicatives. La synthèse des connaissances actuelles doit permettre de définir, dans un second temps, les caractéristiques communes à toutes ces catastrophes (§ 1.2.), et de discuter, dans un troisième temps, la terminologie couramment usitée (§ 1.3.).

1.1. Retours d'expérience : des crues rapides et violentes

La violence des écoulements et leur rapidité d'apparition entraînent d'importants dégâts qui peuvent parfois **devenir dramatiques**. « *Les crues turbides sont systématiquement violentes et subites, ce qui peut les rendre meurtrières* » (Delahaye, 2002). Pour illustrer ce propos, il suffit de s'appuyer sur quelques exemples choisis ici en Seine-Maritime et dans le Calvados (fig. 1.1.). Les événements du 16 juin 1997, et du 9 et 10 mai 2000, restent tristement les plus connus car ils ont entraîné des pertes en vies humaines (MISE-AREAS, 1997).

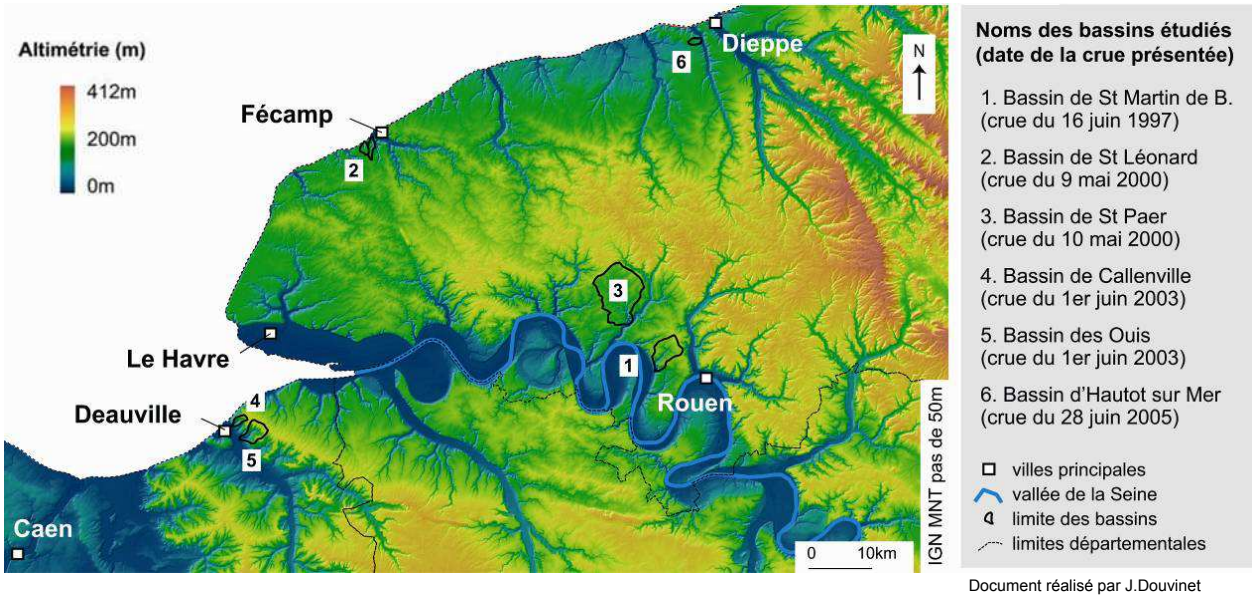


Fig. 1.1. Localisation des différents sites et dates des catastrophes commentées.

1.1.1. La crue du 16 juin 1997 sur le bassin de St Martin-de-Boscherville (76)

Dans la journée du 16 juin 1997, des cellules orageuses se sont développées dans un flux de sud puis ont été ralenties par un courant de nord-est établi le long des côtes de la Manche. Cette situation de blocage est fréquente en région de relief élevé mais elle est plutôt rare dans les régions de plateaux. Cet orage se caractérise par son extension et sa stabilité qui ont permis des cumuls pluviométriques élevés. On relève 80 mm en 6 h sur une zone de 20 km². D'après l'imagerie radar, les pluies ont eu des intensités maximales qui se situent entre 115 et 205 mm.h^{-1}. Les plus forts cumuls donnent une hauteur d'eau de 24 mm entre 19 h et 20 h. En réaction à ces précipitations de forte intensité, quatre « *crues rapides* » sont apparues sur des bassins situés à proximité de l'épicentre orageux (à 15 km à l'ouest de Rouen).

Sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville, en Seine-Maritime (fig. 1.1.), les dommages ont été dramatiques, faisant de nombreux dégâts matériels (coût estimé à 1,5 M€, dont 1 M€ chez les particuliers) et provoquant la mort de trois personnes à *La Vaupalière* (fig. 1.2a.). Le débit de pointe a été estimé à 15 m^3.s^{-1}, soit une production spécifique de 1 m^3.s^{-1}.km^{-2} pour ce bassin de petite taille (14,3 km²). Les témoignages convergent pour affirmer que le niveau d'eau est passé d'une hauteur nulle à 3,5 m par endroit en 15 à 30 minutes (Delahaye, 2002).

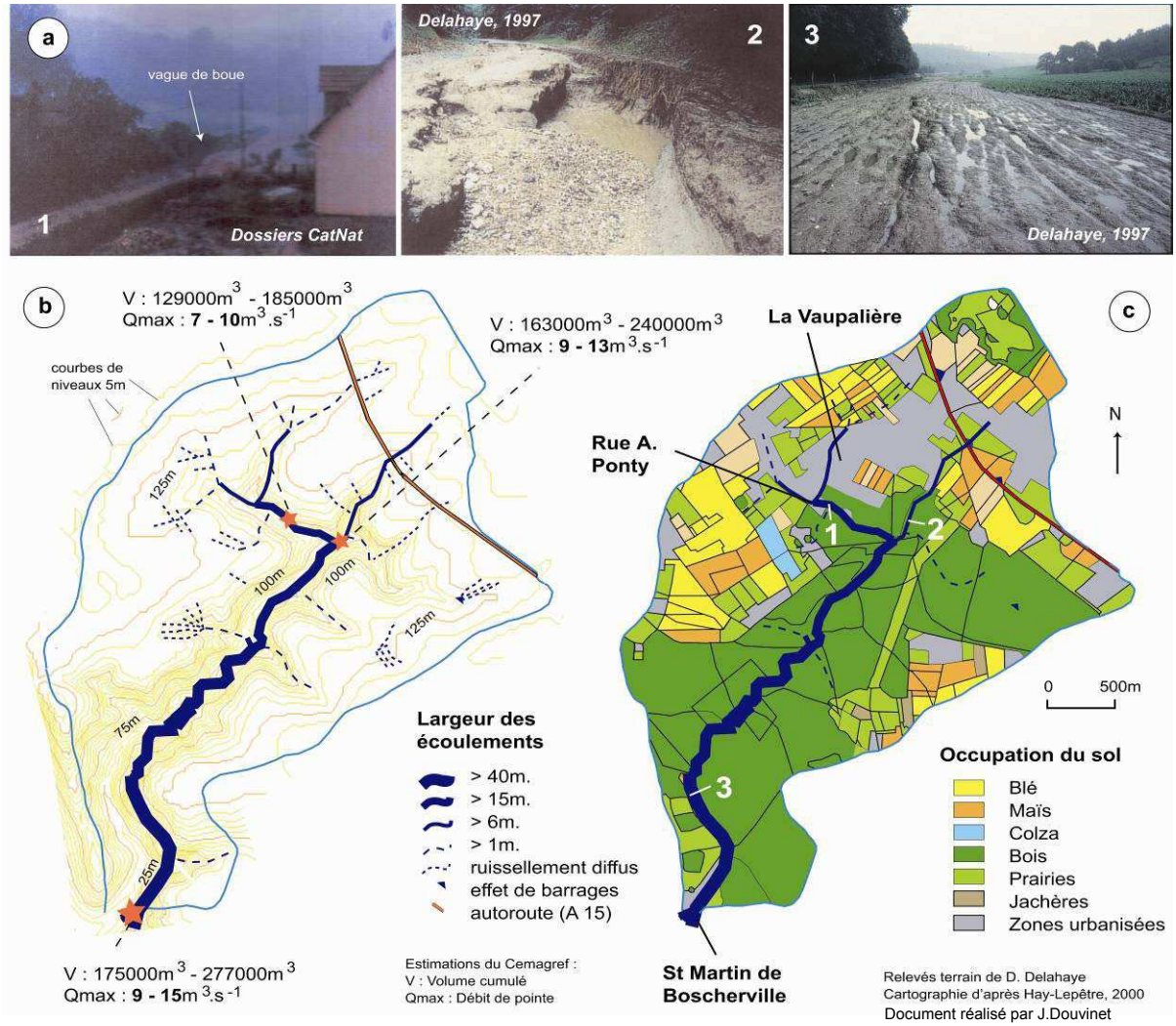


Fig. 1.2. La crue du 16 juin 1997 sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville : **a)** principaux dégâts ; **b)** cinématique des écoulements et estimations du Cemagref ; **c)** occupation du sol.

Les écoulements se sont rapidement concentrés vers le fond du vallon principal (fig. 1.2.). Le flux turbide s'est formé très tôt en amont puisque les dégâts sont présents à l'amorce des talwegs secondaires. La rue Auguste Ponty est devenue un véritable « *torrent* » avec un débit maximum estimé par le Cemagref à 10 $m^3.s^{-1}$. Une « *vague de boue* » a littéralement surgi dans ce vallon (fig. 1.2c.) ; l'eau a incisé la route sur une distance de 300 m et sur une profondeur moyenne de 1 m. **L'écoulement a été suffisamment concentré et volumineux pour produire des érosions importantes sur les parcelles cultivées situées sur les plateaux**. La compétence s'est accrue au fur et à mesure de la concentration des écoulements dans le vallon principal. La charge est restée importante car des matériaux grossiers et des débris ont été retrouvés à l'aval du bassin versant (Delahaye, 1999) ; c'est d'ailleurs là où les sinistres les plus onéreux ont été recensés. Des *roundballers* provenant d'une parcelle située en amont du bassin ont été transportés jusqu'aux pavillons localisés à St-Martin-de-Boscherville (fig. 1.3.).

NORMANDIE

Après l'apocalypse

LA VAUPALIERE, HIER MATIN. Au premier plan l'Opel rouge de Mme Farin et ses deux enfants, emportés par la coulée de boue.

SAINT-MARTIN-DE-BOSCHERVILLE, HIER MATIN. Scènes de désolation après les orages de la nuit.

Près de 20 000 personnes étaient encore privées d'eau potable, hier autour de Rouen, après le déluge qui s'est abattu la veille au soir faisant quatre morts, dont une mère de famille et ses deux jeunes enfants. La procédure de catastrophe naturelle a été engagée pour la trentaine de communes et le millier de personnes touchées, à des titres divers, par ce drame. PAGES 2 A 5

Fig. 1.3. Deux coupures de presse issues de *Paris-Normandie* (édition du 17 juin 1997).

Le passage du flot dans la forêt a permis un filtrage des écoulements boueux, déposant au gré des obstacles (flottants, branches et autres matériels charriés), mais accroissant aussi, par une perte en charges solides, la force tractrice des eaux et sa capacité érosive. L'autoroute a, en revanche, bloqué une partie des écoulements dans la zone amont.

Les écoulements observés lors de crues antérieures (épisodes orageux de 1910 et de 1994) ont suivi la même direction, se concentrant très rapidement dans la rue Auguste Ponty avant de rejoindre le fond du talweg principal. Les dégâts n'ont cependant jamais atteint cette ampleur, qui semble imputable à l'intensité des pluies (Hay-Lepêtre, 2005). Les coupures de presse (fig. 1.3.) évoquent la violence et la rapidité d'apparition avec laquelle les écoulements se sont formés sur ce petit bassin versant de 14,3 km^2. Plusieurs extraits des pages spéciales du journal *Le Havre Libre* (édition du 18 juin 1997) ont été regroupés ci-dessous :

La Vaupalière, une petite bourgade dans la campagne normande près de Rouen, était encore sous le choc, hier matin, après le violent orage qui a fait trois morts dans le village (...) vers 19H (...). La famille qui se trouvait à bord d'une Renault Clio, a vite été le jouet des intempéries, le véhicule ayant été transporté par une forte et brusque montée des eaux ainsi que par

une coulée de boue dans ce petit village entouré de champs de pommiers (…). Des voisins ont tenté en vain de porter secours aux trois passagers devant leur maison, mais ont été repoussés par la violence des eaux (…). Hier matin, les rues en contrebas du village étaient défoncées et les coulées d'eau et de boue étaient toujours visibles (…). En quelques heures, pas moins de dix-huit personnes ont été hélitreuillées de situations parfois périlleuses par des secouristes havrais. « C'était très impressionnant » témoigne un pilote qui se souvient « de la violence du phénomène naturel qui emporte tout, comparable à un torrent d'eau et de boue de montagne » (…). On a récupéré un enfant et un adulte qui étaient coincés dans un arbre près de Saint Martin de Boscherville » explique un sauveteur (…). Ce fut la même chose pour cette famille entière coincée sur le toit de sa maison à St Martin. Tout s'est passé en un quart d'heure (…). « Nous avons dû, mes enfants et moi, nous accrocher à la gouttière et aux arbres pour ne pas être emportés par le torrent d'eau. Nous nous sommes hissés sur le toit et les pompiers nous ont hélitreuillés » poursuit l'homme, montrant sa maison inaccessible à l'embranchement de la route qui conduit à La Vaupalière (…). Un menuisier a vu une Mercedes emportée par les eaux dévaler la colline depuis La Vaupalière, située à 6 kilomètres en direction de St Martin. En contrebas de la route principale, une dizaine de voitures sont sans dessus dessous, mêlées à des tôles froissées, à des bottes de paille, de la boue, des gravats, de la terre et des troncs d'arbres ! Un muret en béton a été emporté comme un fétu de paille. Devant chez elle [une habitante du vallon de l'Ouraille], *la route est défoncée sur plusieurs mètres de long et sur au moins trois mètres de profondeur.*

1.1.2. Les crues du 9 et 10 mai 2000 sur St Léonard et Barentin (76)

Des orages violents se sont successivement abattus dans la région du Pays de Caux entre le 6 et le 13 mai 2000. Ils ont principalement affecté les régions de Fécamp et de Barentin. Les cumuls dépassent de 30 % la normale enregistrée à la station de Rouen-Boos ; en 10 jours, on a relevé 134,4 mm sur la station de Dieppe, ce qui est un record pour la période 1949-2000.

Les rapports météorologiques soulignent une situation particulièrement instable pendant cette période qui se décompose en plusieurs systèmes orageux. Un faible courant de sud à sud-est circule sur toute l'Europe de l'ouest autour des Bas Géopotentiels à l'ouest immédiat du Portugal, associés à une goutte froide à - 20°C. En surface, un courant faible, chaud et diffluent de secteur sud-est à est dominant, circule sur le nord de la France. Les cellules convectives ont produit des lames d'eau comprises entre 50 et 75 mm dans plusieurs secteurs. L'instabilité a été renforcée à la fois par la présence d'un air frais et humide en altitude et par le réchauffement de l'air humide dans les basses couches au cours de la journée.

Le 9 mai, trois crues ont été observées dans des vallons situés dans la basse vallée de la Ganzeville et le long du littoral cauchois (fig. 1.1.). Les pluies ont été estimées à 75 mm en 6 h. Les voies départementales et communales ont été gravement endommagées par des torrents de boue et de nombreux axes de circulation ont dû être fermés dans les environs de Fécamp. Une « *vague de boue* » d'une hauteur de 1 m a été observée vers 16 h à l'exutoire du vallon des Quatre Vaux (fig. 1.4.) et plusieurs véhicules ont été emportés et se sont encastrés aux trois exutoires. Face à la montée des eaux, certains sinistrés se sont même réfugiés sur les toits des habitations et ont été hélitreuillés, notamment à Hautot-Ste-Sulpice, Anveville et Hancarville dans l'arrondissement de Dieppe. Les dégâts humains ont surtout été dramatiques dans le vallon de Grainval, à St Léonard, à l'ouest de Fécamp, « *où une personne a été retrouvée noyée sous la boue, coincée sous une voiture* » (Paris-Normandie, édition du 10 mai 2000).

Le 10 mai, des pluies de 80 mm sont tombées en 1 h 30 environ dans la région de Barentin. Trente minutes après le début de la pluie, vers 18 h 30, l'eau ruisselant sur les parcelles agricoles a commencé à submerger les routes. Trente minutes plus tard, une « *vague de boue* » a déferlé à l'exutoire du vallon St-Paer (40 km²), causant de nombreux dommages matériels. Des ponts ont été entaillés par les écoulements (fig. 1.4d.), avec des incisions qui atteignent près de 5 m de hauteur (fig. 1.4e.). La Préfecture a déclenché le plan ORSEC (Organisation des Secours) le matin du 11 mai. L'importance des dégâts a été très nettement supérieure à ceux constatés lors des intempéries de décembre 1999, alors qu'ils sont bien plus localisés (d'après le rapport du dossier « *CatNat* »).

Légende: a) Route entaillée sur 2 m de profondeur et plus de 10 m de large (exutoire du bassin de St-Paer) ; **b)** la majorité des écoulements turbides ont ensuite alimenté les eaux de l'Austreberthe, qui se raccorde à la Seine en arrivant à Duclair ; **c)** incision à 1km en amont de l'exutoire du vallon sec de St-Paer : mise à jour du substrat crayeux et entailles > 2m de profondeur ; **d)** et **e)** rupture du tablier routier sur la route qui traverse le bassin sur près de 5 m de hauteur.

Document réalisé par J.Douvinet

Fig. 1.4. Dommages occasionnés par la crue du 10 mai 2000 sur le vallon St-Paer.

1.1.3. Les crues du 1er juin 2003 dans la basse vallée de la Touques (14)

Ce type de phénomène hydrologique était jusque là inconnu dans le Calvados (Bernard, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2005a). Contre toute attente, 4 crues rapides ont été observées le 1er juin 2003 dans des bassins versants situés en rive droite de la basse vallée de la Touques (fig. 1.5.).

La station de Deauville a relevé un cumul de 129,7 mm sur une durée de 15 h glissantes, avec un premier épisode le matin, totalisant 37,4 mm entre 6h et 9h, et un second l'après midi, avec 78,9 mm entre 16h et 17h. C'est à la suite du deuxième épisode pluvieux que plusieurs crues sont apparues sur les communes de Touques et Trouville (fig. 1.1.). Les ruissellements sur les versants ont rapidement donné naissance à des écoulements concentrés (fig. 1.6.). Une vague de 1 m de hauteur a subitement surgi à l'exutoire du petit bassin de Callenville, après la chute d'un mur vers 17 h. Près de 50 cm d'eaux turbides se sont ensuite déversés sur la zone portuaire, y déposant une couche boueuse d'une dizaine de centimètres (Annexe 1.1.).

Des canalisations obstruées par les dépôts de boue et par les flottants, ont cédé sous la pression des eaux (fig. 1.6.). De nombreux embâcles ont aussi été localisés sur les différents bassins versants touchés (Bernard, 2005). Des laisses de crue ont été retrouvées à 1,50 m de hauteur dans le centre de Touques, situé à l'exutoire du bassin versant des Ouis (8,3 km²) et à près de 1 m dans certaines rues sur la commune de Trouville (fig. 1.5.).

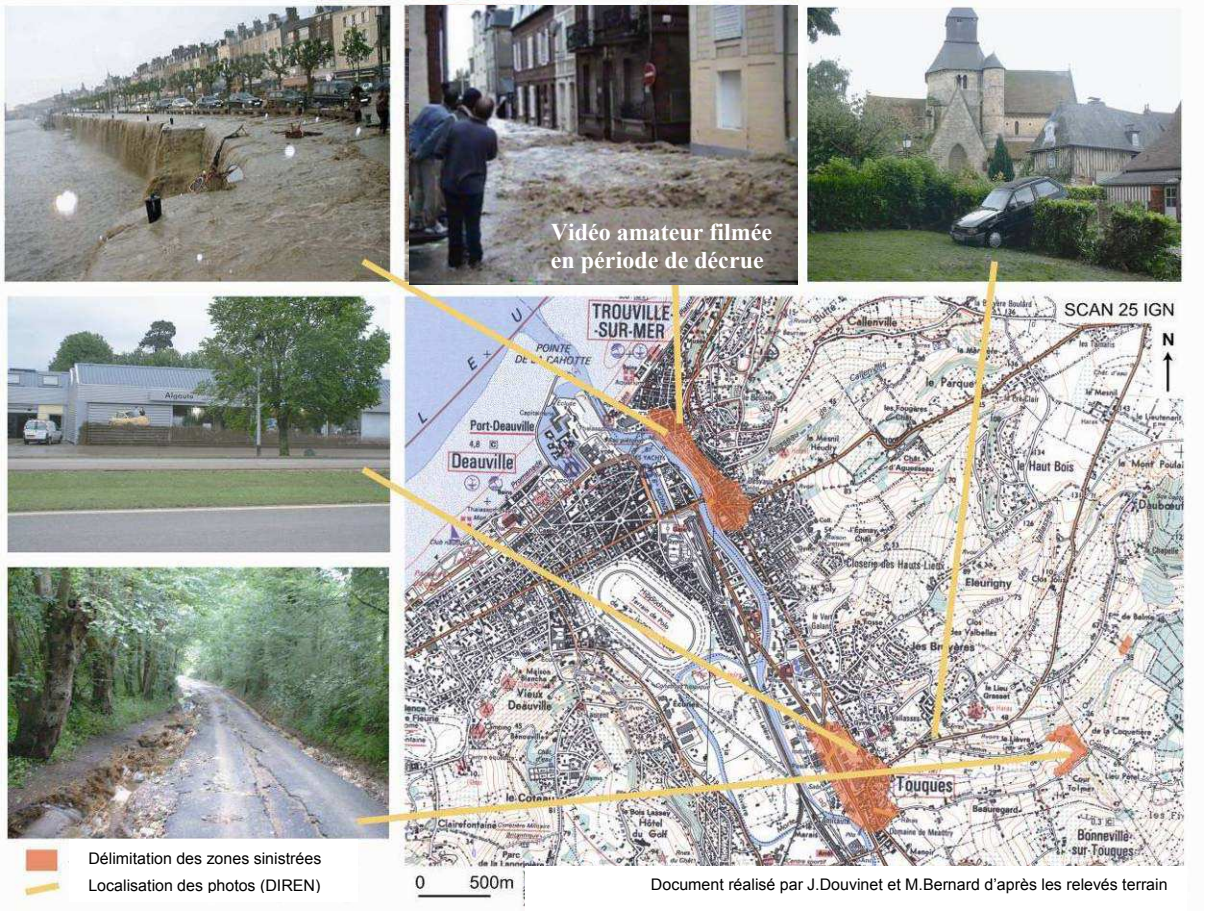


Fig. 1.5. Localisation des dommages et délimitation des zones inondées (d'après Bernard, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2005a, et les données de la DIREN de 2003).

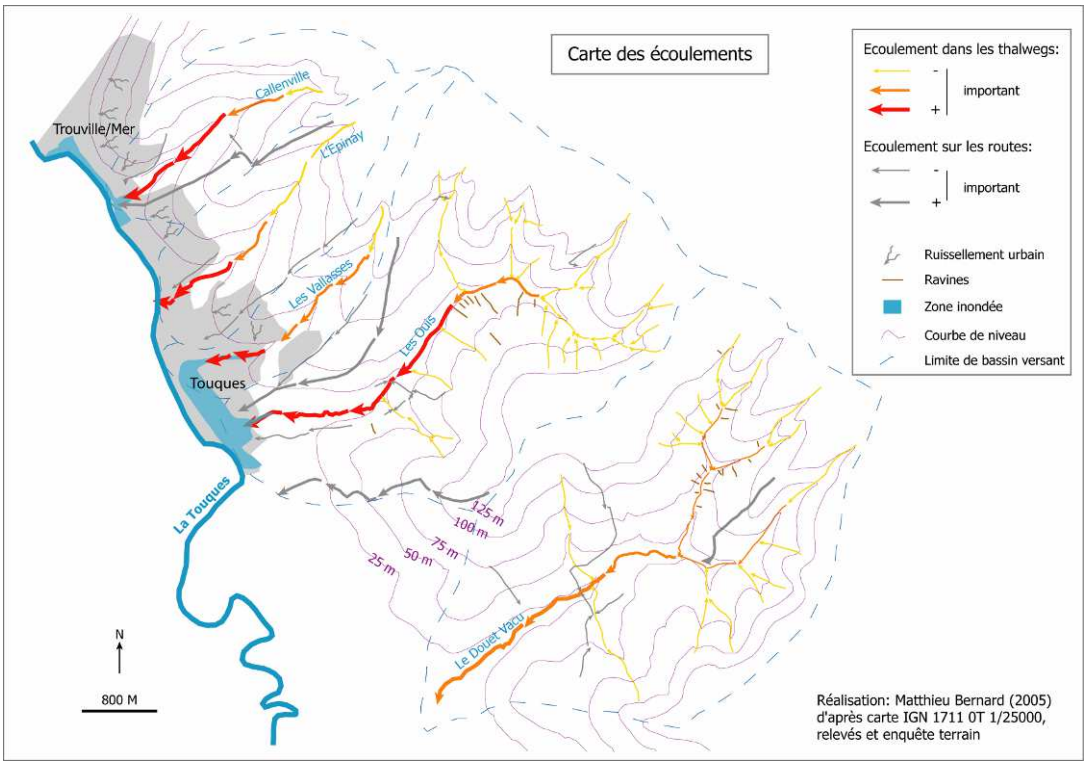


Fig. 1.6. Reconstitution des écoulements lors des crues du 1er juin 2003 (Bernard, 2005).

1.1.4. La crue rapide du 28 juin 2005 sur le vallon d'Hautot-sur-Mer (76)

Dans la nuit du 27 au 28 juin 2005, des pluies de 75 à 100 mm (d'après les images radars) sont tombées en 1 h 30 sur la région de Dieppe. L'épisode a spatialement été très localisé car la station de Neuville-sur-Dieppe (fig. 1.1.) a seulement mesuré 30 mm au cours de la journée. Les orages ont provoqué des affaissements de chaussées, des effondrements de terrain, des coupures de routes et l'interruption du trafic ferroviaire dans les environs de Dieppe.

Le secteur le plus touché se localise à Petit-Appeville, à 3 km à l'ouest de Dieppe. Une crue venant des plateaux (Hautot-sur-Mer) a tout emporté sur son passage. Elle est apparue vers 1 h du matin et a principalement affecté les quartiers résidentiels situés à l'exutoire. Une automobiliste a été emportée par les flots boueux alors qu'elle circulait sur la Cavée d'Hautot. Par chance, la voiture est venue s'encastrer dans d'autres véhicules immobilisés en contrebas.

Une cartographie des impacts morphogéniques (fig. 1.8a.) et une estimation des débits de pointe à partir des laisses de crue (fig.1.8b.) ont été réalisées au lendemain de la crue. Les formes d'érosion observées témoignent de la capacité érosive des écoulements (fig. 1.7.) Des traces de ruissellement diffus sont visibles sur la totalité du bassin versant, principalement en aval des parcelles cultivées et des chemins privés. Plusieurs mouvements de masse ont été localisés sur les bordures de la Cavée d'Hautot (fig. 1.8a.). Les écoulements hypodermiques sont sans doute responsables de la formation de ces « *niches d'arrachement* ». Ils sont associés à des écoulements de surface qui érodent la partie sommitale de ces talus. En revanche, les secteurs de faibles pentes ont été favorables aux dépôts sédimentaires. La rupture dans le transport sédimentaire se traduit par des dépôts de silex, de taille décimétrique (fig. 1.8.). La principale zone de dépôts (fig. 1.8a.) se situe à l'exutoire de ce petit bassin de 1,1 km².

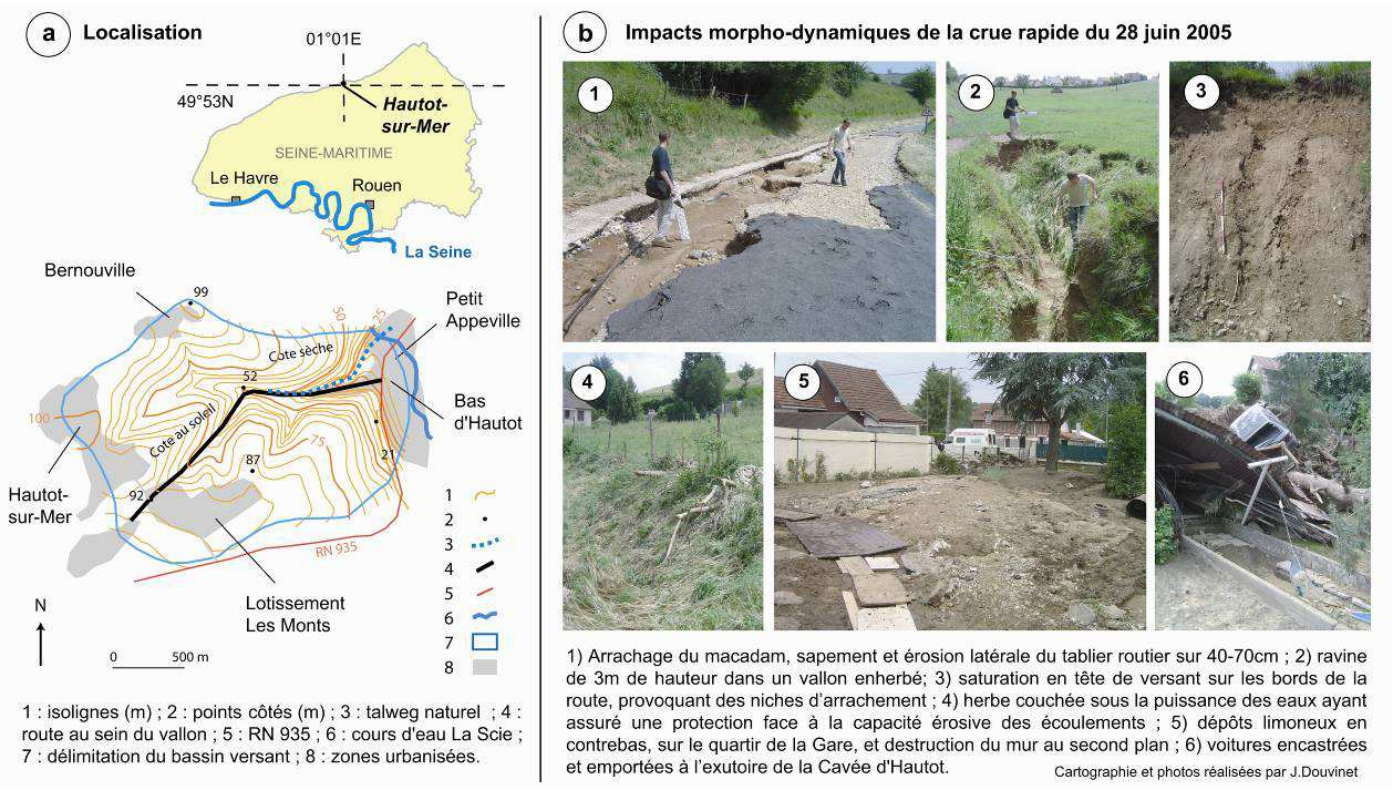


Fig. 1.7. Dégâts observés lors de la crue du 28 juin 2005 dans le vallon d'Hautot-sur-Mer.

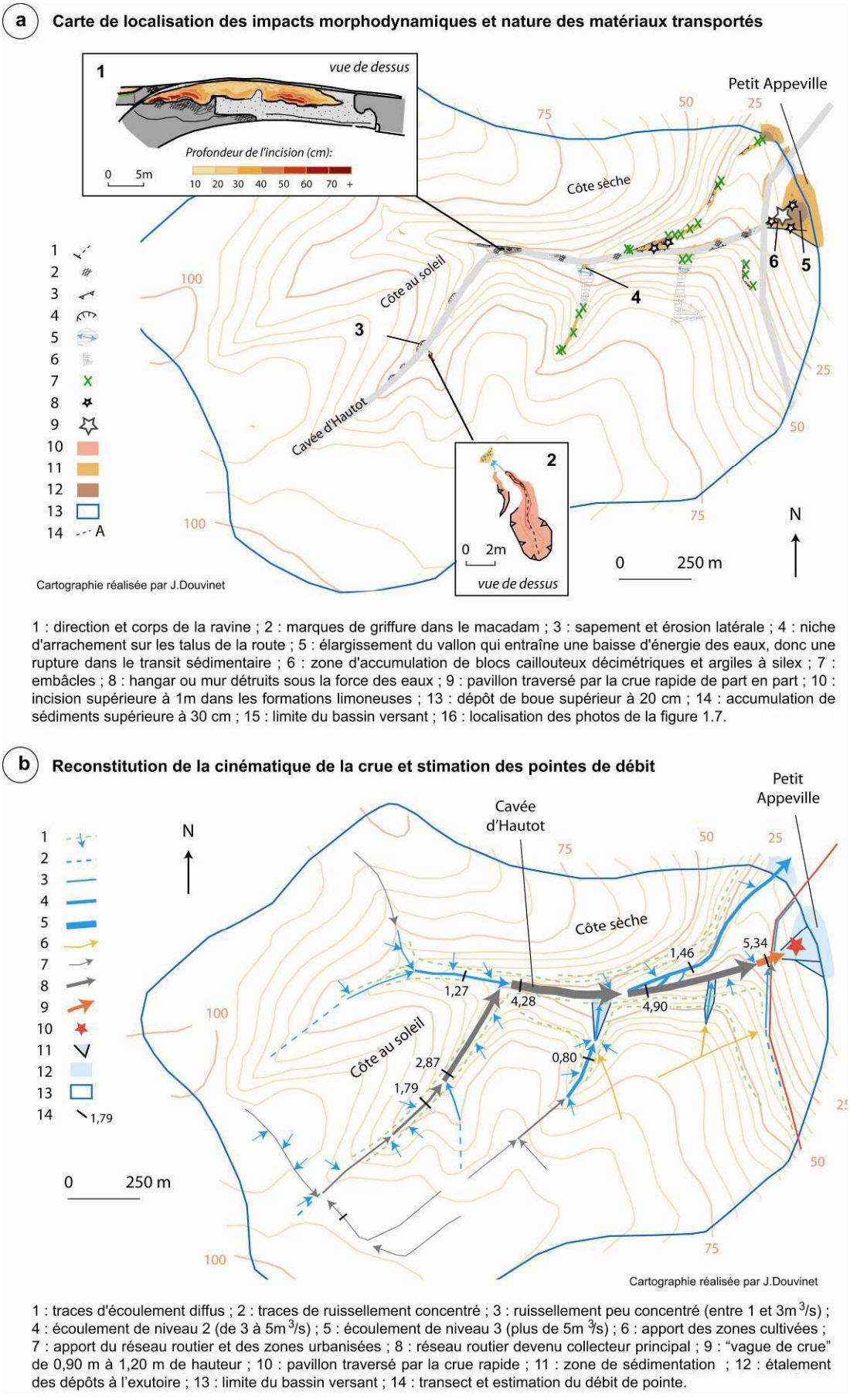


Fig. 1.8. Localisation des impacts et reconstitution des écoulements pour la crue du 28 juin 2005.

Les surfaces enherbées ont globalement échappé à l'érosion. Sous la pression des eaux, les herbes ont fini par se plaquer au sol, constituant alors une bonne protection face au flux hydrique. Une ravine est pourtant observée en aval d'un vallon enherbé (fig. 1.7b.). L'entaille est profonde (2,40 m) et de courte distance (5 m). Des traces de suffosion en tête de ravine, à 90 cm de profondeur, témoignent de l'influence des écoulements hypodermiques. L'incision a sans doute été aggravée par l'apport des écoulements venant du lotissement situé en amont.

Le réseau routier a particulièrement souffert et la route a été coupée à plusieurs reprises. Le revêtement en enrobé de la voirie a été soulevé sur plus de 70 m² à cause de la circulation de l'eau entre l'assise de la chaussée et la couche de roulement provenant du débordement de la canalisation d'eau pluviale. **La route a servi de collecteur principal aux écoulements.** Ainsi, au lieu de suivre le talweg naturel du vallon, la majorité des écoulements a continué sur la route, ce qui explique que les sinistres soient surtout localisés à Petit-Appeville.

La carte de localisation des impacts morphodynamiques et la nature des conséquences matérielles mettent en lumière la violence des écoulements à certains endroits du bassin dont la taille n'est pourtant que de 1,4 km². Les érosions importantes se situent là où des zones de confluences apparaissent, sous-entendant une concentration rapide et efficace des écoulements. La localisation des impacts de la crue constitue, à cet égard, un bon indicateur de la dynamique des écoulements (Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 2000).

La carte des écoulements (fig. 1.8.b) tente de reconstituer la dynamique de ces flux en se basant sur les laisses de crue. Les écoulements se sont regroupés pour former deux axes, puis un seul axe principal en se raccordant sur la route principale. Les hypothèses hautes des pics de crues donnent des valeurs élevées : 4,28 $m^3.s^{-1}$ à la confluence des deux drains (incision de la route) et 5,34 $m^3.s^{-1}$ à l'exutoire. Ces mesures doivent être considérées avec précaution. En effet, elles paraissent sous-estimées par rapport aux témoignages des riverains, qui « *ont aperçu une vague de crue qui aurait atteint un mètre de haut et qui serait apparue au bout de 30 minutes* », mais sont, en revanche, exagérées à cause du remous des écoulements qui donnent des laisses de crue sans doute plus hautes que la hauteur maximale du débit de pointe réel.

1.1.5. Premières conclusions

Ces quatre exemples montrent que les crues ont tendance à dévaler le plus rapidement possible les talwegs des bassins versants et ce, quels que soient les obstacles qui se situent sur leur passage. Les bassins étudiés sont tous de petite taille (< 15 km²) et les pluies, à l'origine de ces événements, sont à la fois intenses et volumineuses. Il n'est pas nécessaire de poursuivre une description de manière détaillée des autres phénomènes observés ces dernières années. Les dégâts sont systématiquement catastrophiques et les ruissellements, suffisamment concentrés et volumineux, acquièrent rapidement la compétence nécessaire pour provoquer des incisions majeures.

1.2. Caractères communs à toutes les catastrophes

Le but recherché ici est de dégager les **traits communs** à toutes ces crises hydrologiques, de **caractériser leur mode de fonctionnement**, et de **mettre en évidence leur originalité par rapport aux autres inondations rencontrées dans ces régions**.

1.2.1. Des crues rapides apparaissant dans des « *vallons secs* »

Dans la plupart des cas, les crues apparaissent sur des petits bassins (des « *vallons secs* ») qui sont dépourvus d'écoulement permanent. Ces vallons ont été façonnés au cours des périodes périglaciaires (Larue, 2005). Le réseau fossile possède un système d'emboîtement de vallées qui fait la **connexion** hydrologique entre les plateaux et les fonds des vallées humides drainées par un cours d'eau permanent (fig. 1.9.). Ce réseau se remet à fonctionner à la suite de longues périodes pluvieuses hivernales ou sous l'effet des pluies orageuses de printemps et d'été (Auzet *et al.* 1995a ; Delahaye, 1999, 2002). On passe ainsi d'un approvisionnement en ruissellement érosif depuis les plateaux à la formation d'une « *onde de crue* » dans les vallées sèches, pour finir à une « *crue rapide* » surgissant aux exutoires urbanisés de ces bassins.

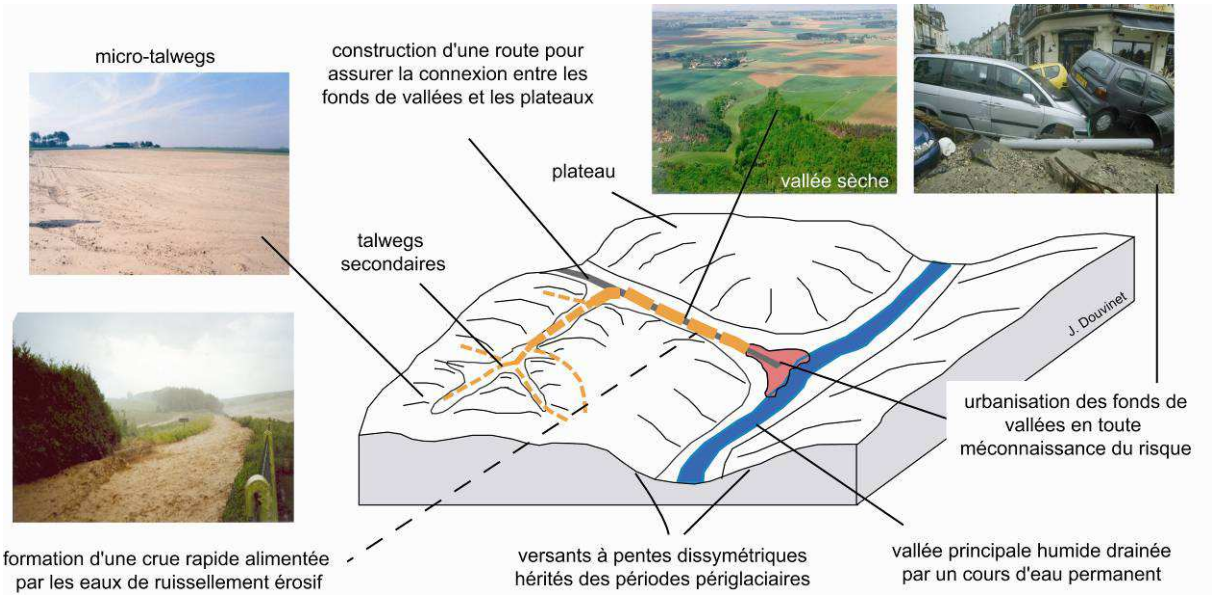


Fig. 1.9. Des crues rapides surgissant aux exutoires de vallons secs urbanisés (schéma modifié d'après Gaillard, 2004).

Les écoulements se propagent rapidement dans les fonds de vallons, en renforçant leur énergie à tel point qu'il peut se former une « *vague de crue* » ou « *mur d'eau* » (fig. 1.10d.). Cela ressemble à une « *vague déferlante* », qui apparaît lorsque le débit venu en amont est en augmentation constante et rapide dans un chenal, et que la tête du flot est continuellement freinée dans sa progression par des obstacles et la rugosité du flot (Antoine *et al.*, 2001). Les effets des frottements diminuent avec l'augmentation des volumes ruisselés. La rugosité est très élevée en tête de flot puisqu'elle est liée aux effets combinés de la friction du sol et de la rugosité du lit d'écoulement (Bravard et Petit, 2000). La tête du flot est, en revanche, la zone la plus érosive et la plus compétente ; les écoulements peuvent transporter d'énormes blocs par charriage (fig. 1.3.), parfois sur une distance de plusieurs kilomètres (fig. 1.11i.).

Malgré ce frottement en tête de flot, la **diffusion des « *vagues de boue* »** est facilitée par la présence des routes construites dans les talwegs de ces vallons secs. Historiquement, ces réseaux de communication raccordent les vallées aux plateaux. Dans la plupart des exemples précédents, **le réseau routier accélère la vitesse de propagation des eaux**, alimentées par le ruissellement érosif, d'autant plus qu'il a souvent le rôle de collecteur des écoulements. De nombreuses photos témoignent de cette influence (figs. 1.10e., 1.10f. et 1.10g.).

Légende : a) Concentration des ruissellements provenant des champs cultivés en amont du bassin (Auchy-les-Hesdin (62), 7 juillet 2001) ; **b)** Pont dépassé par des écoulements torrentiels (Jaulgonne (02), 9 juillet 2000) ; **c)** Arrivée d'une "*vague*" de crue dans la rue Auguste Ponty (St-Martin-de-Boscherville (76), 16 juin 1997) ; **d)** Violence des écoulements après l'onde de crue (St-Martin-de-Boscherville (76), 16 juin 1997) ; **e)** Déferlement des ruissellements dans le fond d'un vallon secondaire (Dominois (80), 3 juin 2000 ; St-Denoueux (62), 7 août 2001) ; **f)** Connexion des écoulements dans le fond du talweg principal (Le Parcq (62), 7 juillet 2001) ; **g)** Les routes construites dans les talwegs servent de collecteurs (Ponches-Estruval (80), 3 juin 2000) ; **h)** Arrivée soudaine sur des zones urbanisées (Trouville (14), 1er juin 2003).

Fig. 1.10. Violence des écoulements arrivant aux exutoires urbanisés des petits bassins versants.

1.2.2. Une forte concentration en éléments solides et des dégâts importants

Les « *crues rapides* » se démarquent aussi par une **forte concentration en éléments solides,** « *où les matériaux sources proviennent des formations pédologiques et où les particules détachées sous l'action de la pluie et/ou du ruissellement sont entraînées par l'écoulement de l'eau en surface, diffus ou concentré dans des rigoles et/ou des ravines* » (Auzet et Malet, 2005). La filiation avec l'érosion des sols est évidente et les sols constituent la principale source d'apports en sédiments. Les fines (argiles, silt, limons) proviennent du lessivage des parcelles cultivées. Les sédiments les plus grossiers sont issus d'ablations plus importantes (ravines, mouvements de masse).

Les dépôts retrouvés aux exutoires et les dégâts corollaires sont importants (fig. 1.13.). Quel que soit le volume transporté, les matériaux constituant la charge solide proviennent de « *zones sources* » identiques que l'on peut différencier de la manière suivante :

- apports de matières en suspension (MES) par altération des formations pédologiques et incisions des espaces cultivés (fig. 1.11.). Les rills ou inter-rills sont rarement observés lors des événements printaniers et estivaux ; on passe ainsi du ruissellement diffus à l'apparition de rigoles et/ou de ravines qui marquent le pouvoir érosif des écoulements (Hauchard, 2002). Les formes d'érosion prennent parfois des ampleurs considérables (exemple de la ravine sur le bassin des Quatre Vaux (76) lors de la crue du 13 mai 1998, cf. fig. 1.11b.) ;

- apports des glissements ou mouvements de masse. Les écoulements hypodermiques et le ruissellement peuvent induire une déstabilisation des versants. Des « *niches d'arrachement* » sont souvent observées sur les bords des routes situées dans les fonds de talwegs (fig. 1.12.). Dans les formations sableuses, le départ des sables peut entraîner une perte de cohésion, ce qui peut expliquer la chute brutale de pans entiers de murs, pouvant par exemple atteindre plusieurs mètres de long comme à Artres (59) en 1999 (fig. 1.12h).

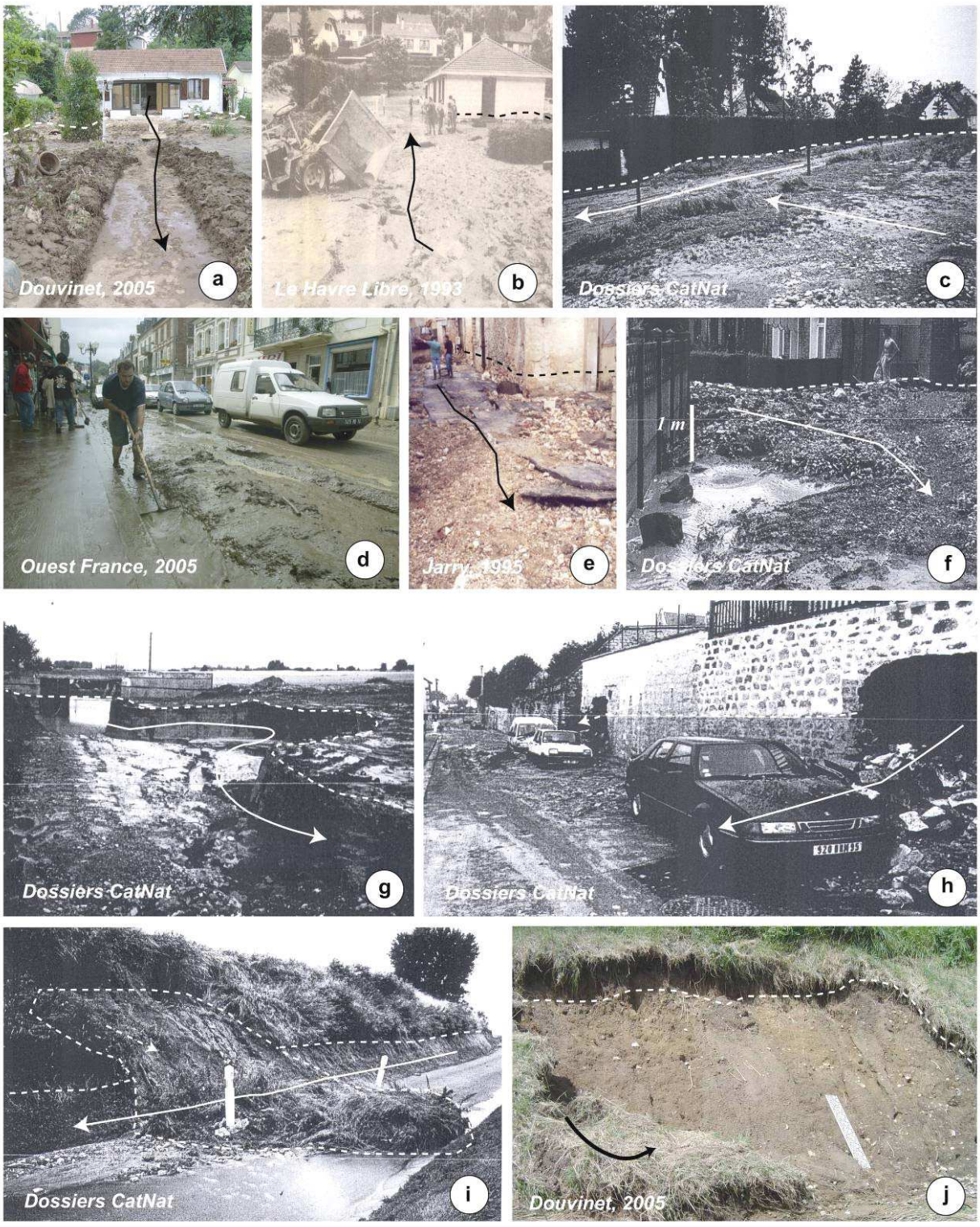
- apports par incision dans les réseaux routiers situés en fond de talweg. La circulation importante des eaux peut entraîner le décollement du bitume, voire le départ des matériaux grossiers constituant le tablier routier comme les silex (fig. 1.13.). Les carrefours et les zones de confluence entre les routes (classiquement appelées des « *Cavées* ») sont fréquemment les endroits présentant les plus fortes incisions, comme l'illustre la principale entaille observée sur le vallon d'Hautot-sur-Mer (76) le 28 juin 2005 (fig. 1.3.).

- apports par entraînement de débris : des cabanons, des voitures, des tôles, des tuiles ou des bottes de paille (…) peuvent se mêler aux sédiments transportés par la crue.

Il est cependant **difficile** de quantifier les volumes charriés à l'échelle du bassin versant. A notre connaissance, **très peu d'études existent sur les phénomènes printaniers et estivaux.** Les seules données disponibles existent sur des sites expérimentaux, à l'échelle des parcelles. Une étude expérimentale menée sur la parcelle d'Erlon (29 ha), un site équipé par l'INRA de 1989 à 2003 situé dans le Laonnois (Aisne), a permis de quantifier les sédiments pouvant être transportés par une crue estivale (Angeliaume et Wicherek, 1997). Les cumuls de pluies à l'origine de cet événement (23 juillet 1994) sont importants : 86,4 mm en 1 heure, avec une intensité maximale de 210 $mm.h^{-1}$. La charge moyenne mesurée à la sortie de la parcelle a été de 10 $kg.ha^{-1}$, contre 0,4 à 1,6 $kg.ha^{-1}$ pour les crues hivernales. Les concentrations en MES ont atteint 60 $g.l^{-1}$ au cours de l'épisode, avec un pic de 260 $g.l^{-1}$ au paroxysme de la crue. Une aggradation de 360 tonnes de terre a été mesurée à la sortie de la parcelle. Les déplacements sur les versants ont été considérables : 18 tonnes de terre seulement (soit 5 %) sont issus des ravines et des rigoles observées sur le bassin (Angeliaume *et al.*, 1994 ; Angeliaume, 1996).

Légende: a) Ravine dans un vallon enherbé et traces de suffosion (Hautot-sur-Mer (76), 28 juin 2005) ; **b)** Incision sur une profondeur > 4 m et mise à jour du substrat crayeux (Val aux Clers (76), 6 mai 2000) ; **c), d), f)** En se concentrant, les eaux décapent la surface des sols (La Nouette, hameau de Crogis (02), 25 août 1995) ; St-Martin-de-Boscherville (76), 16 juin 1997) ; **e)** Les plants de betterave se sont couchés sous le passage des flux boueux (Dompière-le-St-Père (62), 16 mai 2006) ; **g)** Ravines accentuées par le passage des tracteurs pour l'entretien des vignes (Essômes (02), 9 juillet 2000) ; **h)** et **i)** Couverture des lignes inter-vignes par des sarments qui alimentent ensuite le débit solide de la crue et forment des embâcles (Essômes (02), 9 juillet 2000).

Fig. 1.11. Incisions dans les sols (**a-b**) et traces de décapage sur les surfaces cultivées (**c-i**).



Légende : a) Dépôts d'un hauteur de 30 cm sur Petit-Appeville (Hautot-sur-Mer (76), 28 juin 2005) ; **b)** et **d)** Boue accumulée sur la route (Lillebonne (76), 9 juin 1993; Trouville (14), 01 juin 2003) ; **c)** Dépôts de blocs et silex de tailles pluridécimétriques témoignant d'une baisse de compétence par affaiblissement de la pente (Ambrief (02), le 8 mai 1993) ; **e)** Morceaux de bitume alimentant la charge solide (Monneaux (02), 25 août 1995) ; **f)** Dépôts grossiers d'une épaisseur > 1m (Sachin (62), 20 août 2002) ; **g)** Incision en aval d'un pont liée à la dispersion de l'énergie et à des écoulements tourbillonnants (Saultain (59), 29 juillet 2000) ; **h)** Cavités dans les murs provoquées par le départ des particules fines et des sables qui entraînent une perte de cohésion entre les matériaux (Artres (59), 25 mai 1992) ; **i)** Mouvements de masse induits par la percolation (Soucy (02), 7 juillet 2001) ; **j)** Ecoulements hypodermiques sur les rebords de talus (Hautot-sur-Mer (76), 28 juin 2005).

Fig. 1.12. Importance des dépôts retrouvés au sein des bassins versants (**a-d**) ; incisions dans le tablier routier (**e-g**) et enrichissement de la charge solide par des mouvements de masse (**h-j**).

Légende : a) Dépôts de blocs armés de silex témoignant de la compétence des eaux turbides (Crogis (02), 25 août 1995) ; **b)** Passage de la coulée à travers un pavillon de part en part (Hautot-sur-Mer (76), 28 juin 2005) ; **c) e) f)** Lorsque la hauteur d'eau dépasse 30cm, les voitures peuvent être emmenées jusqu'aux exutoires des bassins et s'encastrer dans les zones de confluences (Barentin (76), 9 mai 2000 ; Touques (14) et Trouville (14), 1er juin 2003) ; **d)** Les gravats et les voitures peuvent aussi s'accumuler sur plusieurs mètres dans des zones de rétrecissement des flux (Le Houlme (76), 16 juin 1997) ; **g)** Incisions latérales et déstabilisation du pont situé à l'exutoire du bassin (Essômes (02), 7 juillet 2001) ; **h)** Inondations d'habitations implantées dans le fond de talweg (Villequier (76), 9 juin 1993).; **i)** Chute d'un mur qui fournit des éléments grossiers; des briques ont été retrouvées à plus d'1km en aval (Aubin-St-Vaast (62), 14 mai 1994).

Fig. 1.13. Ampleur des dommages subis aux exutoires urbanisés.

1.2.3. Un système érosif rapidement développé sur de courtes distances

Plusieurs travaux se font focalisés sur les processus érosifs élémentaires, notamment sur des sites expérimentaux (Boiffin *et al*., 1988 ; Ludwig, 1992 ; Angeliaume *et al*., 1994 ; Auzet *et al.,* 1995b ; Le Bissonnais et Le Souder, 1995 ; Benkhadra, 1997 ; Cerdan, 2001 ; Joannon, 2004). Le but recherché ici n'est pas de rappeler les mécanismes de l'érosion des sols déjà largement décrits par ailleurs, mais de résumer le **fonctionnement du système érosif** lors de phases de ruissellements importantes qui sont couramment observées lors des *« crues rapides »*.

La morphologie conditionne la première phase de concentration notable (Papy, 1991 ; Ludwig, 1992). Le ruissellement diffus se forme au niveau de la tête de vallon et des versants qui encadrent le talweg. L'eau se concentre ensuite dans ce dernier. Le fonctionnement global d'un bassin résulte de l'agglomération de ces bassins élémentaires autour de collecteurs plus importants. La concentration étant rapide et importante, les formes intermédiaires de types rill/inter-rill sont très peu représentées dans le Pays de Caux (Delahaye, 2002). Cette rareté est aussi observée dans l'ensemble des régions limoneuses du nord-ouest de la France, où ces formes ne représentent pas plus de 12 % des figures d'érosion (Auzet *et al.,* 1993).

Ces formes se développent sur des pentes moyennes supérieures à 5 %, et le plus souvent lorsque le sens du travail du sol est parallèle à la pente. Le seuil de pente est ici important car le ruissellement doit atteindre une vitesse supérieure à 3 $cm.s^{-1}$ lui permettant d'inciser le sol (Govers, 1985). Ce type d'érosion est modeste quand la surface amont est réduite (tab. 1.1.). L'érosion des versants n'apparaît qu'en été, à la suite d'épisodes pluvieux violents, voire très exceptionnellement durant les hivers très humides (Ouvry et Ligneau, 1993).

Formes	*Tracé*	*Longueur*	*Largeur*	*Profondeur*	*Pente*	*Localisation*
Griffe	sinueux	< 1 m	< 10cm	5-6cm	> 1 %	versant
Rill/Inter-rill	rectiligne	~100 m	10-20 cm	5-10cm	> 3 %	versant
Rigole	sinueux	~10 m	5-80 cm	5-20 cm	> 3 %	versant/talweg
Ravine	peu sinueux	~100 m	50 cm - 1 m	> 50 cm	< 6 %	talweg
Petit ravin	peu sinueux	~100 m	> 50 cm	> 1 m	< 6 %	talweg

Tab. 1.1. Distinction des formes d'érosion en fonction de leur taille et de leur localisation (d'après Dufour *et al*., 1990 ; Auzet *et al*., 1993, 1995).

Les formes en chevelu, qui correspondent à la jonction de plusieurs griffures formant une rigole sur les versants, sont également rarement observées (tab.1.1.). **Les têtes de vallon sont le siège privilégié du ruissellement en nappe et diffus.** La concentration intervient lors de l'arrivée du ruissellement dans les talwegs des bassins élémentaires. Mais l'incision n'est pas systématique. Si la pente reste faible (< 3 %), le fond du talweg suffisamment plat ou encore le volume d'eau insuffisant, l'écoulement peut continuer son chemin sous forme d'une lame d'eau triant les matériaux en surface comme le ruissellement en nappe (Delahaye, 2002).

L'incision linéaire se généralise lorsque la pente est comprise entre 6 et 7 % (tab .1.2.). Les figures d'érosion vont prendre différentes formes suivant les conditions locales. Lorsqu'elles le matériau est assez homogène, l'ablation est généralement profonde. Le fond de ces formes, irrégulières, est constitué de ressauts qui correspondent à des zones de perte de compétence du ruissellement à cause d'une charge solide trop forte.

D'autres formes évoluent plutôt latéralement, avec une faible profondeur (20 à 30 cm) et sur une grande largeur (2 à 5 m). La semelle de labour est responsable de cette résistance à l'incision. Le volume d'eau n'est pas la principale variable explicative des formes d'incision rencontrées, le rôle de la morphologie locale, qui commande la concentration de l'eau, est également pesant (Auzet *et al*., 1993 ; Delahaye, 2002).

A l'échelle du bassin, les processus sur les versants et sur les talwegs sont finalement modulés par le jeu des interactions entre la vitesse des écoulements et le seuil critique de cisaillement au-delà duquel les premières formes d'érosion sont susceptibles d'apparaître.

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="3"></td><td colspan="6">PROCESSUS SUR LES VERSANTS</td></tr>
<tr><td colspan="6">Caractéristiques du ruissellement</td></tr>
<tr><td colspan="2">Absence de ruissellement</td><td colspan="4">Présence de ruissellement</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">Vitesse d'écoulement (Ve) inférieure au seuil critique (Vc)</td><td colspan="2">Vitesse d'écoulement (Ve) supérieure au seuil critique (Vc)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Effet de la pluie sur la surface : détachement des particules</td><td colspan="4">Effet de la pluie sur la surface : détachement des particules</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td>OUI</td><td>NON</td><td>NON</td><td>OUI</td><td>NON</td><td>OUI</td></tr>
<tr><td rowspan="3">PROCESSUS DANS LE TALWEG</td><td>-</td><td>PAS D'EROSION Formation d'une croûte de battance</td><td>PAS D'EROSION</td><td rowspan="2">PAS D'EROSION</td><td rowspan="2">EROSION DIFFUSE SUR VERSANT</td><td colspan="2" rowspan="2">RIGOLES SUR VERSANT</td></tr>
<tr><td>Ve < Vc</td><td colspan="2" rowspan="2">CAS IMPOSSIBLES (absence d'écoulements)</td></tr>
<tr><td>Ve > Vc</td><td colspan="4">EROSION CONCENTREE DANS LE TALWEG</td></tr>
</table>

Tab. 1.2. Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules de sol et des caractéristiques du ruissellement (modifié d'après Auzet *et al.* 1995, *in* Delahaye, 2002).

Tel est, en règle générale, le mode de fonctionnement du système érosif dans les bassins élémentaires (bassins d'ordre 1) lors de ruissellements importants. Ce schéma perdure lors de l'agglomération des bassins d'ordre 2, 3, 4 et plus. Bien évidemment, le volume d'eau en mouvement étant de plus en plus important, les formes d'érosion passent rapidement du stade de la **rigole** à celui de la **ravine**, **même sur de courtes distances**. Potentiellement, ces formes peuvent se développer jusqu'au moment où l'écoulement va rejoindre une vallée humide, puis se diluer dans le cours d'eau. « *A l'exutoire des bassins d'ordre 3 ou 4, les figures d'incision peuvent être impressionnantes avec des profondeurs de plusieurs mètres ou une extension latérale de 30 à 40 mètres lorsque le matériel est compact en profondeur* » remarque D. Delahaye (2002), notamment en évoquant l'incision majeure du vallon des Quatre Vaux (fig. 1.11a).

Contre toute attente, les formes les plus grandes sont souvent recensées aux exutoires des bassins d'ordres 1 et 2 (fig. 1.4.). Le morphologie des talwegs explique ce **constat paradoxal** : ils sont plus resserrés et plus pentus, ce qui explique la **forte énergie du ruissellement** qui compense la faiblesse des volumes. A l'inverse, les chenaux des bassins d'ordre 3 et 4 sont plus adaptés pour évacuer les forts débits (fond plat, pente faible) et pour éviter des incisions majeures. Les matériaux grossiers, formant des cônes d'épandage immédiatement en aval de ces incisions, ne sont jamais transportés sur de longues distances.

1.3. Précisions terminologiques : « *coulées boueuses* », « *crues rapides* » et « *phénomènes hyper-concentrés* »

Associées à une manifestation exacerbée du ruissellement érosif, ces crues sont souvent désignées comme des « *coulées de boue* » ou des « *crues turbides* ». Ces termes apparaissant peu appropriés et les différentes terminologies peuvent être discutées dans cette section.

1.3.1. Préambule : une absence de consensus terminologique

Ces « *crues rapides* » ne font pas l'objet d'un consensus terminologique (Delahaye, 2002 ; Auzet et Malet, 2005). Elles sont couramment désignées par les termes « *coulées boueuses* » ou « *coulées de boue* » à cause de leur forte turbidité (IGE, 2001). C'est sous cette désignation que la procédure de reconnaissance de l'état de « *catastrophe naturelle* » reconnaît les communes sinistrées par ces événements (Douvinet, 2006a). D. Delahaye (2002) les désigne par le terme « *crues turbides* » pour insister sur le lien qui existe entre les territoires agricoles des plateaux et les vallées humides. D'autres définitions semblent aussi adaptées à ces événements, telles que « *crues rapides* » (Dauge, 1999) ou « *écoulements hyper-concentrés*» (Meunier, 1993).

Des **problèmes terminologiques** apparaissent à la lecture des documents réglementaires. Deux définitions montrent que les crues sont assimilées à d'autres phénomènes et, *in fine,* à d'autres processus. Dans un rapport de l'IFEN (Institut Français pour l'Environnement) paru en 2004, ces « *crues rapides* » correspondent à des « *crues violentes d'été sur le littoral atlantique* [qui apparaissent] *lorsque des masses d'air orageuses abordent des reliefs côtiers comme le relief du Pays Cauchois en Seine-Maritime. Les crues correspondantes sont catastrophiques : le ruissellement intervient rapidement et la montée des eaux surprend les riverains, mettant souvent directement leur vie en danger. Ainsi, lors de la catastrophe de Vaison la Romaine en septembre 1992, le niveau de l'Ouvèze montait d'un mètre toutes les dix minutes au niveau du Pont romain* ». Dans le cahier des charges du SAGE, le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (1995), ces crues « *se produisent par exemple sur les petits affluents de la Seine, sur des petits cours d'eau côtiers de Normandie, mais principalement en tête de bassins comme ceux de l'amont de l'Aisne, de l'Aire ou de l'Yonne. Ces terrains sont généralement constitués de terrains imperméables (ou imperméabilisés) à forte pente* ». Il semble, dès lors, nécessaire de **préciser** le vocabulaire à utiliser pour désigner ces phénomènes.

1.3.2. Des « *coulées de boue* » aux « *crues rapides* » : éléments de définition

Un bilan sur les termes couramment utilisés pour désigner ces « *crues rapides* » du nord de la France est proposé (tab. 1.3.). Chacune des définitions fait référence aux particularités et au mode de fonctionnement du phénomène hydrologique décrit. L'objectif est de savoir ici quelle est la définition la plus appropriée aux phénomènes précédemment commentés. Les méthodes de classification des crues s'appuient sur des **paramètres hydrométriques** (vitesses d'écoulement, hauteurs d'eau, tailles des bassins, temps de concentration) **associés au type de matériaux mobilisés** (fines, graviers, cailloux) et **aux modes de déplacement dominants**. On peut également distinguer les crues suivant leur **étendue spatiale** – échelle locale, ou régionale – et **temporelle** – épisodes ponctuels ou généralisés (Mathot et Mariani, 1994). La durée du phénomène peut s'étaler sur plusieurs jours pour des débordements de cours d'eau, voire sur plusieurs mois pour des remontées de nappe (Douvinet et Agasse, 2006).

Terminologie	Références	Définitions
Coulées boueuses	George et Verger (2006)	**Masses de terrain** argileux ou limoneux s'écoulant lentement par gravité sur un versant.
Coulées de boue	Genest (*in Malet, 2003*)	Corrélative à la niche de décollement, **la solifluxion entraîne ce matériel argileux à constance fluide en une langue épaisse et bosselée,** puis le matériau argileux s'étale à son extrémité en un cône aplati.
Coulées de boue *(mud flows)*	IFEN (2004)	Des crues liées aux effets des précipitations intenses qui peuvent être dommageables sur les sols en particulier peu couverts (vignes,) et / ou fragiles. **L'énergie mécanique des gouttes peut détruire la structure du sol jusqu'à la quasi-liquéfaction.** Dès lors qu'il existe une pente même légère, la boue se met en mouvement et l'énergie des « flots » érode tout sur son passage. Les coulées de boue sont souvent mortelles.
Coulées boueuses *(muddy floods)*	Guide PPR « *risque de débordements de rivières torrentielles* » (MEDAD, 2006)	C'est une propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu leur cohésion dès la mise en mouvement ; les matériaux y sont intimement mélangés à **une quantité d'eau telle que la masse en mouvement a franchi sa limite de liquidité.** Les matériaux susceptibles de perdre ainsi leur cohésion sont des argiles, des limons, des sols, des roches décomposées ou des éboulis fins. L'eau peut pénétrer au sein des matériaux par infiltration avant le déclenchement de la coulée ou au moment de la rupture par concentration des eaux de ruissellement morphologique.
Coulées de boue à caractère torrentiel	Cemagref (1986)	**Les coulées de boues à caractère torrentiel se distinguent des crues torrentielles par le fait que les eaux se chargent fortement de matières en suspension, au point que la densité relative du mélange devient si élevée que la coulée peut sustenter et transporter divers matériaux denses et volumineux, y compris d'énormes blocs de rochers.**
Crues des rivières torrentielles ou des torrents	Guide méthodologique PPR : Risques d'inondations (MEDD,1999)	Lorsque des précipitations intenses tombent sur tout un bassin versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau, d'où des crues brutales et violentes dans les torrents et les rivières torrentielles. Le lit du cours d'eau est en général rapidement colmaté par le dépôt de sédiments et des bois morts peuvent former des barrages, appelés embâcles. Lorsqu'ils viennent à céder, ils libèrent une énorme vague, qui peut être mortelle.
Crues torrentielles	Guide PPR « *risque de débordements de rivières torrentielles* » (MEDAD, 2006)	**Elles se forment par enrichissement du débit d'un torrent en matériaux solides qui accroissent fortement son pouvoir érosif.** L'enrichissement en matériaux peut provenir de l'arrachement des berges dû au débit anormal du cours d'eau ou à un ruissellement important sur le bassin versant amenant une importante charge solide. Le volume des matériaux transportés au cours d'une seule crue peut être considérable ».
Crues à cinétique rapide	Rapport Dauge (1999)	**Crues pouvant durer d'une heure à plusieurs heures, avec une réaction rapide aux pluies, un gradient de montée élevé du débit, des débits de pointe très importants mais un volume modeste.**
Crues rapides dites crues instantanées	Rapport Dauge (1999)	**Crues brèves dues à des pluies d'orage de quelques dizaines à plus de cent mm / heure pendant une à deux heures sur quelques hectares à quelques km² sans possibilité de les localiser précisément, ni les prévoir.** On admet qu'elles ont une possibilité d'occurrence uniforme sur une surface importante avec même loi de probabilité d'intensité.
Crues subites dites crues-éclair *(flash flood)*	Rapport Dauge (1999)	**Crues se produisant sur des surfaces de quelques km² à la centaine de km², dues à des pluies orageuses intenses plus structurées dans l'espace et le temps de 100 à 300 mm dans certaines régions.** Le débit de pointe de la crue centennale (qui revient en moyenne une fois tous les cent ans) peut se situer entre 50 et 1000 $m^3.s^{-1}$ selon les régions.
Crues rapides dites crues brutales	Rapport Dauge (1999)	**Crues se produisant sur des surfaces de 500 km² à 5000 km² pendant 6 à 36 heures avec un temps de concentration de moins de 12 heures pour des bassins de 1 000 km²,** avec des débits de pointe de crue centennale pouvant se situer entre 500 et 5 000 $m^3.s^{-1}$ selon les régions.
Ecoulements hyper-concentrés (*hyper-concentrated stream flows)*	Guide PPR « *risque de débordements de rivières torrentielles* » (MEDAD, 2006)	Ecoulements en continuité avec le charriage fluvial classique quant à leur concentration volumique, mais dont l'hydraulique est particulière notamment par le fait que, en chenal endigué, le fort transport solide rend la hauteur d'écoulement supérieure à celle qu'on calcule pour l'eau non chargée. La très forte charge des écoulements hyper-concentrés génère en outre des chocs violents et multiples sur les obstacles.

Tab. 1.3. Définitions des termes utilisés dans la littérature scientifique et les textes réglementaires.

Une « *coulée boueuse* » désigne un mouvement de masse, s'écoulant par gravité, et non un phénomène hydrologique. Les définitions de Genest (*in* Malet, 2003), du Cemagref (1986), de l'IFEN (2004) ou du MEDAD (2006), complètent la définition proposée par P. George (1960). Elles font toutes référence au processus de liquéfaction, stade au-delà duquel un mouvement de terrain franchit sa limite de liquidité. Les termes « *coulées de boue* » et « *coulées boueuses* » ne correspondent donc pas aux processus étudiés ici, et ces deux termes sont bien impropres au sens géomorphologique *stricto sensu* (Pierson et Costa, 1987 ; Auzet et Malet, 2005).

Les « *crues torrentielles* » se forment par enrichissement du débit liquide en matériaux solides qui accroissent fortement son pouvoir érosif. Proposée dans le Guide PPR, « *Plan de Prévention des Risques de débordements de rivières torrentielles* », écrit par le MEDAD (Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable) en 2006 [1], cette définition est strictement réservée aux inondations brutales qui affectent le pourtour méditerranéen ou les secteurs montagnards à fortes pentes (Gaume *et al.*, 2000 ; Antoine *et al.*, 2001 ; Estupina-Borell, 2004). Des cumuls de pluies élevés, dépassant 200 mm, sont à l'origine de ces crues dévastatrices qui apparaissent sur des torrents aux pentes supérieures à 20%.

Le terme « *crues à cinétique rapide* » est également utilisé pour désigner ces phénomènes qui « *peuvent durer d'une heure à plusieurs heures, avec une réaction rapide aux pluies, un gradient de montée élevé du débit, des débits de pointe très importants mais un volume modeste* » (tab. 1.3.). La définition n'est cependant pas limitée aux épisodes affectant le sud de la France. En effet, « *Il semble dorénavant évident que les crues rapides avec transport de matériaux (par charriage ou par suspension) ne concernent pas que les territoires de montagnes, mais aussi des départements comme la Meuse ou la Seine Maritime où des cours d'eau peuvent aussi avoir momentanément un comportement torrentiel avec un transport solide lié à des pratiques agricoles ou d'aménagement du territoire qui aggravent les conséquences des écoulements* » (MEDAD, 2006). **On trouve ici des arguments en faveur de l'utilisation du terme « *crues à cinétique rapide* ».**

Dans le rapport établi sous la direction du préfet Dauge (1999), **trois catégories** de « *crues à cinétique rapide* » **sont différenciées** : « *crues instantanées* », « *crues-éclair* », « *crues brutales*». Les « *crues rapides* » du nord peuvent rentrer dans le sous-type des « *crues instantanées* » car ce terme regroupe toutes les « *crues produites par des orages et sur des petites surfaces* ». Cependant, l'étendue spatiale (quelques hectares à quelques km²) et la durée des épisodes pluvieux (une à deux heures) semblent trop réductrices. Les événements précédemment décrits se sont en effet produits sur des bassins **plus grands** et à la suite d'**épisodes pluvieux de plus longue durée**. Les termes « *crues subites* » ou « *crues brutales* » désignent par contre des événements totalement différents des « *crues rapides* » du nord de la France, tant les pluies (> 300 mm), les surfaces des bassins (> 100 km²) et les débits de pointes (> 50 $m^3.s^{-1}$) sont bien plus élevés.

Ce bilan incite à retenir le terme, somme toute assez **généraliste**, de « *crues rapides* » pour désigner les phénomènes printaniers et estivaux qui apparaissent dans les régions du nord de la France. On peut proposer une définition spécifique : ce sont des « *crues turbides, rapides et violentes qui dévalent des petits bassins (< 40 km²) sans écoulement (des vallons secs) dans des régions de plateaux, suite à des cumuls de pluies importants (> 50 mm) tombant en quelques heures (< 6 h)* ». Le terme « *crues rapides* » étant classiquement réservé aux phénomènes du sud de la France, on propose désormais de comparer les deux modes de fonctionnement (§ 1.3.3.).

[1] Dans ce guide PPR spécifique aux crues torrentielles, les réunions de juin 2004 ont souligné la cohérence de la démarche de la réalisation de ce guide complémentaire au guide *PPR Inondations.* Il est clairement souligné, en tant que suite particulière à donner à ce sujet, qu'il faut élargir le sujet sur les bassins versants à fortes pentes, en dehors du contexte montagnard. Toutefois, après le retard lié à un défaut de pilotage du groupe de travail, il est décidé de borner la note aux situations de montagne notamment pour des aspects réglementaires tout en affichant les similitudes et les différences avec les situations voisines ainsi que les limites de la note et les aspects "généralisables" à d'autres cas.

1.3.3. Des points communs avec les« *crues rapides* » du sud de la France ?

Le but de la comparaison avec des épisodes recensés dans le sud de la France est de voir si les « *crues rapides* » du nord de la France présentent une **originalité** ou une **spécificité** dans leur mode de fonctionnement. Une « *crue rapide* » apparaissant à l'exutoire d'un vallon sec de 15 km² n'est bien évidemment pas aussi dramatique que les crues dévastatrices du Borne au Grand Bornand (1987) ou de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (1992). Des similitudes semblent néanmoins observées dans leur fonctionnement, en particulier un enrichissement progressif du débit en matériaux solides qui s'accompagne d'un accroissement de la capacité érosive.

Cette étude comparative se heurte rapidement à l'absence de données hydrométriques pour caractériser les « *crues rapides* » apparaissant dans les régions du nord de la France. Les approches expérimentales sont rendues délicates pour plusieurs raisons :

- l'absence de mesures directes (ou *in situ*) au moment des épisodes ;
- la disparition des rares stations de jaugeage, emportées par le passage de la crue ;
- le manque d'équipements sur des vallons secs, dépourvus d'écoulement pérenne, et où une « *crue rapide* » peut apparaître 1 fois tous les 20 ou 30 ans (Delahaye, 2002).

Les rares estimations des débits de pointe sont néanmoins significatives de la violence de certaines crues : entre 12 et 23 $m^3.s^{-1}$ à l'exutoire du bassin de Villers-Ecalles (13,4 km²) ; entre 9 et 15 $m^3.s^{-1}$ à St-Martin-de-Boscherville (14,3 km²) (Delahaye, 2002) ; 12,4 $m^3.s^{-1}$ sur le bassin des Ouis (6,5 km²). D'autres travaux indiquent des débits qui sont tout aussi remarquables : 28,3 $m^3.s^{-1}$ à l'exutoire du bassin versant d'Epaux-Bézu (19,3km²) (Hydratec, 2001) ; 40 $m^3.s^{-1}$ à l'exutoire du vallon St Paer (44 km²) (MISE, 2001). **En transformant les débits de pointe bruts en valeurs spécifiques par unité de surface (par km²), les débits spécifiques pour les crues du nord de la France sont compris entre 1 et 2 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ (tab. 1.4.).**

Les « *crues rapides* » sont plus facilement mesurables dans les régions du sud de la France car elles apparaissent aux exutoires de bassins versants de plus grande taille (< 1 200 km²) et couramment drainés. **Une attention plus forte est portée sur ces phénomènes importants.** Les « *crues rapides* » étudiées ont été choisies dans des contextes diversifiés (massif alpin ; arc méditerranéen) pour élargir au maximum la gamme d'événements étudiés. Les pics de crue bruts sont élevés et ils varient entre 2,3 et 6 000 $m^3.s^{-1}$ (fig. 1.14a.). Les débits spécifiques sont compris entre 0,4 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ et 9,3 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$, ayant exceptionnellement atteint 20 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ lors de la crue des cadéreaux à Nîmes en octobre 1988. En faisant une comparaison entre toutes les crues, **certains débits spécifiques sont relativement proches** entre des événements observés dans le nord et dans le sud de la France (fig. 1.14b.).

La « *formule de Myer* » a aussi été calculée pour comparer les débits de pointe mesurés ou estimés sur les différents bassins versants (Cosandey, 2003). Cette formule rapporte le débit de pointe à la taille du bassin *A* portée à la racine carrée. Réméniéras (1986) justifie la valeur de cet exposant par le fait qu'en présence d'une averse uniforme, le volume total écoulé est proportionnel à la superficie du bassin et que le temps de concentration est schématiquement équivalent à la longueur du cours d'eau (Bravard et Petit, 2000). **Les écarts sont importants** entre les crues du nord et du sud de la France. Les *cotes Myer* obtenus sur les bassins du nord varient entre 2,37 et 6,29, tandis qu'elles sont comprises entre 15 et 50 pour les bassins du sud de la France. Les valeurs sont comprises entre 30 et 50 pour les crues observées sur les petits bassins situés en Brie (Dacharry, 1988) dont la superficie est inférieure à 15 km². **Les écarts sont en partie expliqués ici par le rôle plus important attribué à la surface du bassin dans la formule de *Myer*, accentuant ainsi les différences de taille entre les bassins étudiés.**

	Date des crues	Nom du bassin versant	Lieu du point de mesure	Volumes des pluies et durée	Taille du bassin (km²)	Pointe de débit (m^3/s) [Q]	Volume de l'évènement (m3)	Débit spécifique (l/s/km²) [q]
crues rapides du NORD de la France	16 juin 1997	St Martin de B.	St Martin de B.	80 mm (6 h)	14,3	9 - 15	277 000	629 - 1 048
	16 juin 1997	Villers-Ecalles	Villers-Ecalles	80 mm (6 h)	13,4	12 - 24	369 000	859 - 1 791
	09 mai 2000	St Paer	Barentin	45 mm (2 h)	44,1	~ 40	non connu	907
	09 juillet 2000	L'Ordrimouille	Epaux-Bézu	240 mm (3 jrs)	19,2	28,3	non connu	1 473
crues rapides et crues torrentielles du SUD de la France	14 juillet 1987	Le Borne	Grand Bornand	93 mm (3h)	87	~ 200	60 000 000	2 298
	3 octobre 1988	Cadéreaux	Nîmes	220 mm (3 h)	50	~ 1 000	non connu	~ 20 000
	12 septembre 1992	L'Ouvèze	Vaison la Romaine	176 mm (3 h)	585	1 200	37 000 000	1 709
	8 octobre 1994	Le Brusquet	Draix	25,6mm (1 h)	1,1	2,3	non connu	2 129
	5 octobre 1995	Le Gardon	St Hilaire de B.	227 mm (10 h)	328	456	40 000 000	1 390
	13 novembre 1999	L'Orbiel	Boulihonnac	432 mm (2 jrs)	239	315	18 000 000	1 318
	13 novembre 1999	L'Aude	Carcassonne	450 mm (2 jrs)	1 770	810	46 000 000	457
	9 septembre 2002	Le Gardon	Remoulins	400 mm (12 h)	1 800	6 000	777 000 000	3 333
	9 septembre 2002	La Vidourle	Sauve	687 mm (12 h)	190	690	60 000 000	3 631
	6 juin 2007	L'Algoue	Villefranche	47,6 mm (2h)	199	47,5	1 000 000	23,8

Tab. 1.4. Comparaison entre quelques « *crues rapides* » du nord et du sud de la France.

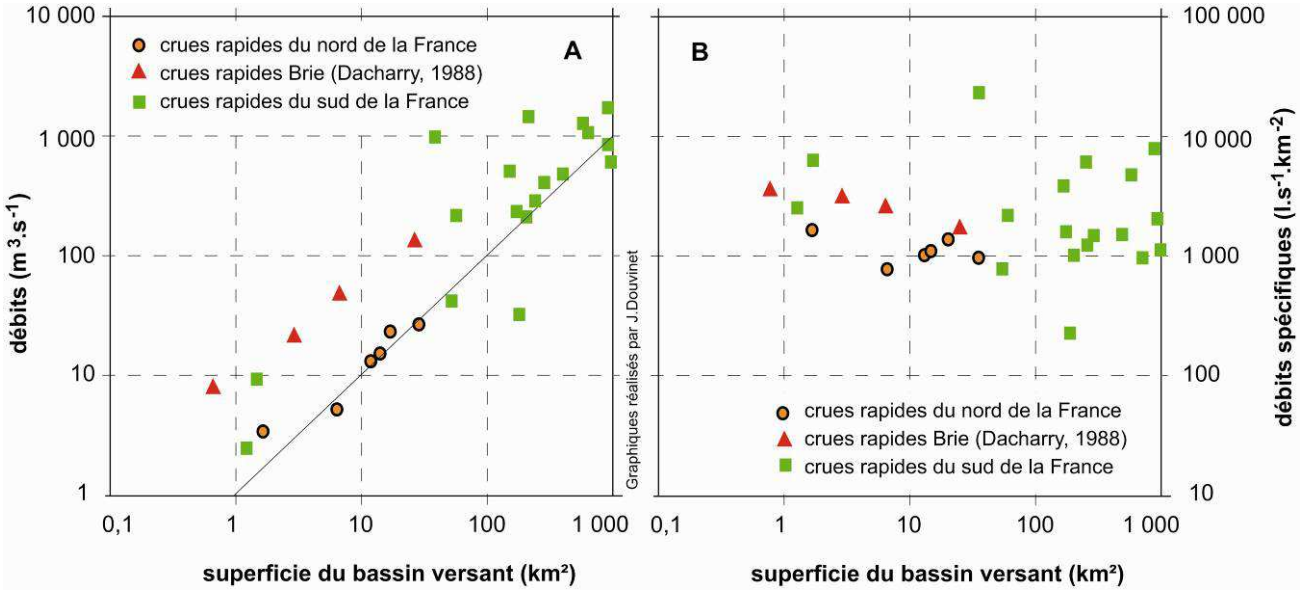


Fig. 1.14. A) Débits de pointes et **B)** Débits spécifiques versus la taille des bassins versants (d'après Bravard et Petit, 2000 ; Delahaye, 2002 ; Ledoux, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2007c).

La crue des cadéreaux, qui a touché la région nîmoise le 3 octobre 1988, a été comparée à la crue du 1er juin 2003 qui est apparue dans la région de Trouville (14) (fig. 1.15.). L'épisode nîmois se place parmi les plus fortes crues observées dans des bassins de petite taille (Gaume *et al.*, 2003). La crue des cadéreaux a provoqué le décès de 9 personnes, ravagé le centre ville et fait près de 100 M€ de dommages matériels (Gout, 1993). Les cumuls des pluies (420 mm mesurés au Mas de Ponge sur une durée de 6h) ont entraîné des ruissellements importants,

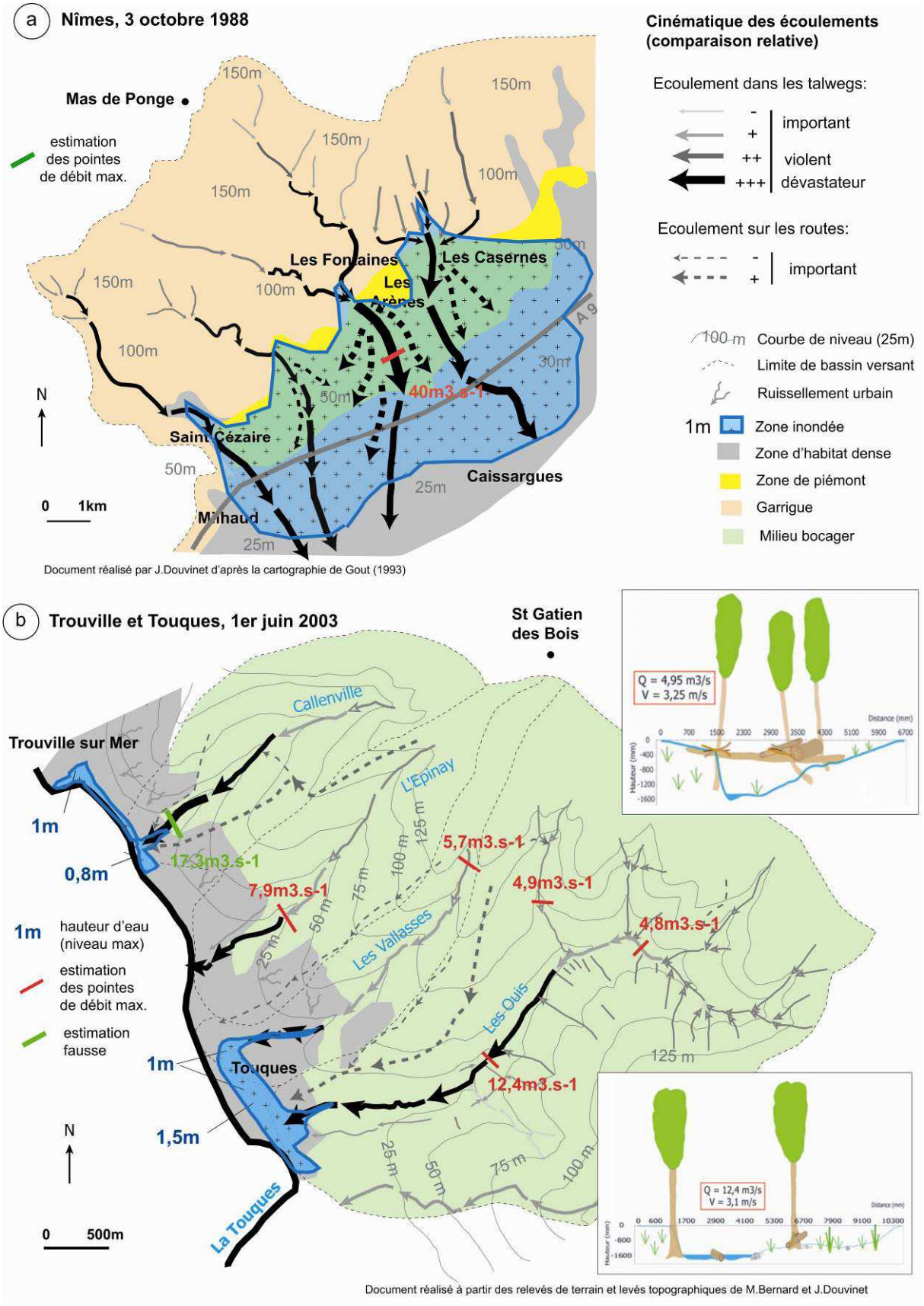


Fig. 1.15. Comparaison des cinématiques des écoulements : **a)** crue de 1988 à Nîmes, dans le Gard (d'après les travaux de Goult, 1993) ; **b)** crue du 1er juin 2003 dans la région de Trouville, dans le Calvados (d'après Bernard, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2005a).

que n'ont pu contenir les fossés souterrains et les cadéreaux qui passent sous la ville de Nîmes. L'imperméabilité des sols, associée à des pentes prononcées, a entraîné un temps de concentration compris entre 20 minutes et 1 heure (MEDD, 2005). Le débit spécifique a été estimé à près de 20 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$. L'ampleur et le coût des dommages à Nîmes ne sont pas comparables avec ceux des inondations de Trouville le 1er juin 2003 (dégâts estimés à 5,3 M € et un seul décès recensé). Le débit spécifique est estimé à l'exutoire à près de 4 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ (soit 5 fois moins), en considérant que les estimations faites à partir des laisses de crues avaient été surestimés à cause des phénomènes d'embâcles (Douvinet *et al.*, 2005a).

La reconstitution de la cinématique des écoulements (fig. 1.15.) montre cependant que **la concentration progressive des eaux sur les versants puis leur diffusion rapide et violente vers les exutoires urbanisés, sont similaires sur ces deux bassins versants.** Les différences de volumes et de débits de pointe s'expliquent alors par des différences :

- de **pluies** : 420 mm en 6h dont 220 mm en 3h, contre 127 mm en 15h, dont 87 mm en 1h ;
- de **morphologies** : les bassins en amont de Trouville (~ 2,5 km^2) sont vingt fois plus petits que les surfaces en amont de Nîmes ; la pente moyenne des cadéreaux est de 12 %, contre des pentes comprises entre 2,3 % et 4,3 % pour les Ouis et le ru de Callenville ;
- d'**occupations du sol** : un milieu de garrigue face à un milieu bocager plus infiltrant ;
- d'**urbanisations** : un rapport de 1 à 50 existe entre les populations des deux communes.

Cette étude permet finalement de montrer que les débits de pointe, une fois rapportées à la taille des bassins versants, sont relativement proches entre les crues du nord et du sud de la France. Si des différences majeures s'observent entre les surfaces (de 1 à 1 000 km^2) et les volumes et durées des pluies (quelques minutes à quelques jours), certains débits spécifiques sont compris dans les mêmes intervalles, entre 1 et 2 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$.

1.3.4. Caractérisation rhéologique : des « *écoulements hyper-concentrés* »

Si ces crues ont une forte concentration solide, la boue ne devient jamais la composante principale de ces écoulements qui restent très largement à **dominante hydraulique** (> 80 %). Du point de vue rhéologique, le terme *« écoulement hyper-concentré »* (Pierson et Costa, 1987 ; Coussot et Meunier, 1996) semble plus adapté. L'utilisation de cette terminologie permet de mettre en évidence **les stades transitoires entre les domaines de la mécanique des roches, des sols, des fluides et l'hydraulique torrentielle**. Les deux extrêmes opposent les processus fluviatiles à 100 % (type débordement de plaine) aux matériaux solides sur un axe horizontal, et les matériaux cohésifs aux éléments granulaires sur un axe vertical (fig. 1.16.).

Les « *écoulements hyper-concentrés* » sont des phénomènes où l'effet des matières en suspension est prépondérant dans le comportement du fluide. Le mélange en écoulement présente les caractéristiques d'un fluide non-newtonien (ce qui signifie qu'il ne se comporte plus comme un écoulement d'eau) et la contribution du sédiment solide transporté à la hauteur d'écoulement ne peut plus être négligée. En effet, par rapport à l'écoulement fluvial classique, la concentration est telle qu'elle induit une irrégularité du débit, modifie le profil de vitesse et la capacité de transport (Jiongxin, 1999; Malet, 2003 ; Lavigne et Suwa, 2004).

Les écoulements sont en continuité avec le charriage fluvial (la concentration volumique), mais leur hydraulique est particulière, notamment par le fait que le **transport solide rend la hauteur d'écoulement supérieure à celle qu'on calcule pour l'eau non chargée** (MEDAD, 2006). L'écoulement n'est pas visqueux, ni épais, et la forte turbulence permet le maintien des

éléments en suspension. Le fluide est qualifié de monophasique : le transport des matériaux est homogène, sans tri granulométrique, même s'il peut devenir, de manière temporaire, biphasique (transport par grano-classement) (fig. 1.16.).

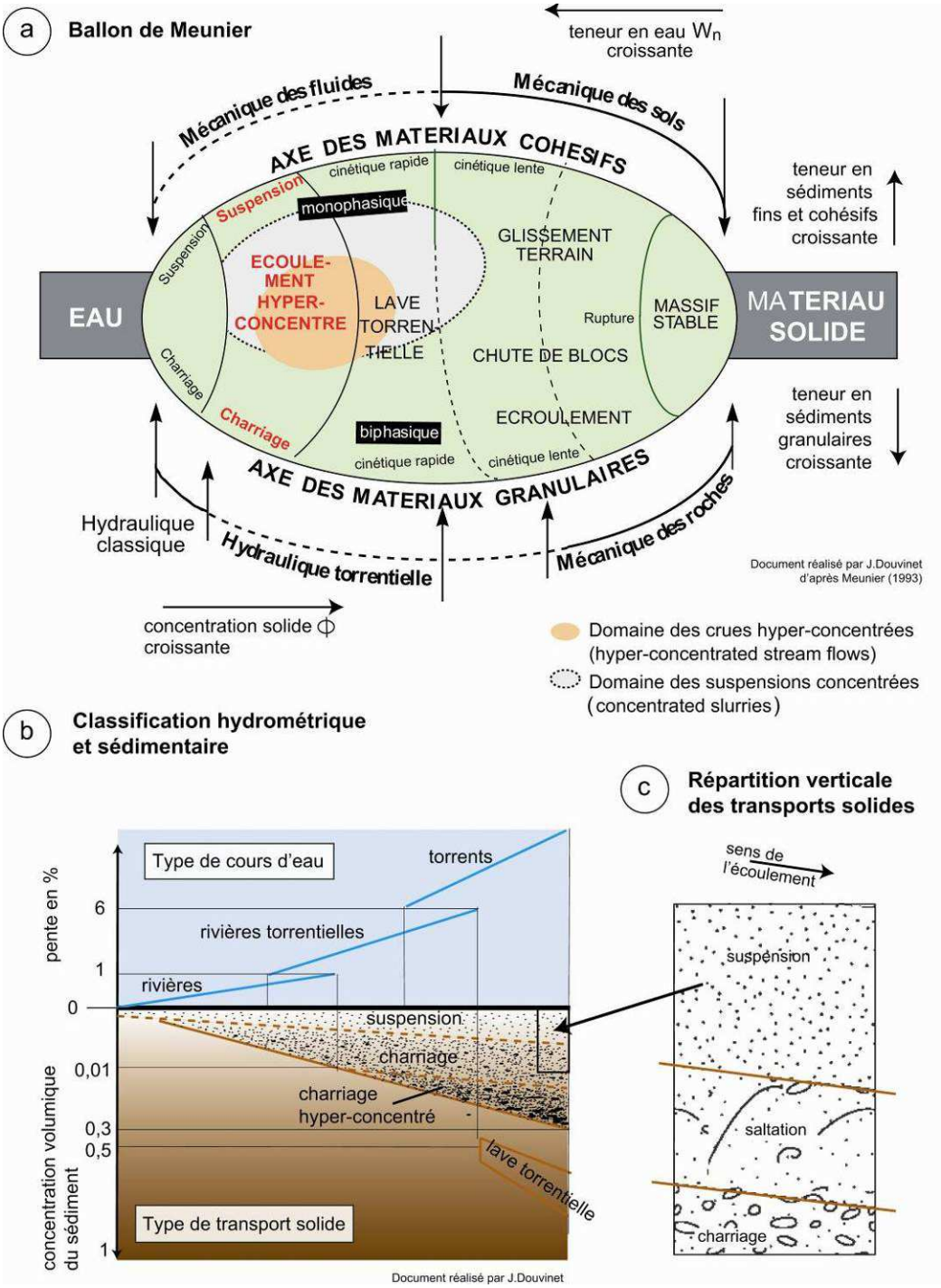


Fig. 1.16. a) Classification rhéologique et ballon de Meunier (d'après Coussot et Meunier, 1996) ; **b)** Classification hydrométrique ; **c)** zoom sur les trois types de transport sédimentaire.

Dès que la charge en suspension et le charriage excèdent les capacités de transport, des zones de sédimentation et de dépôts se forment. Dans la plupart des cas, on retrouve des accumulations de sédiments dans les secteurs où l'énergie est la plus faible : soit lorsque le

vallon s'élargit, car l'énergie va se disperser dans les zones de divergences des écoulements (élargissement de la section transversale de la vallée) ; soit lorsque la pente du profil en long s'atténue, l'abaissement de la pente réduisant, de fait, la force tractrice critique (Bravard et Petit, 2000). Par opposition, les véritables « *coulées de boue* » sont des écoulements visqueux, entraînés par déplacement de masse et alimentés par des formations superficielles meubles (Coussot et Meunier, 1996 ; Malet, 2003 ; Lavigne et Suwa, 2004 ; Auzet et Malet, 2005).

1.3.5. Choix du terme à utiliser

Deux termes sont potentiellement utilisables pour désigner ces crues apparaissant dans les régions du nord de la France : ce sont des « *crues rapides* » si on s'attache à des paramètres **hydrométriques** ; des « *écoulements hyper-concentrés*» si on choisit des critères **rhéologiques**. Ne pouvant pas statuer sur la concentration solide des écoulements, le terme « *crues rapides* » sera préféré pour le reste de cette étude. On gardera à l'esprit que les débits spécifiques sont assez proches de ceux observés dans le sud de la France, bien que les volumes et les débits de pointe soient différents pour des raisons essentiellement climatiques et géomorphologiques.

Conclusions du chapitre 1

La présentation de quelques « *crues rapides* » permet de dresser un premier bilan sur le mode de fonctionnement et sur les caractères communs à toutes ces crises hydrologiques. Ces crues sont originales par rapport aux autres inondations rencontrées dans ces régions du nord de la France, et elles s'en démarquent par les caractéristiques suivantes :

- **des crues apparaissant sur des « *vallons secs* » dépourvus d'écoulement pérenne ;**
- **un système érosif qui se développe rapidement sur de courtes distances ;**
- **une montée des eaux et une propagation de l'onde de crue très rapides (< 1 h) ;**
- **des débits spécifiques élevés au regard de la petite taille des bassins versants ;**
- **des crues surprenant les populations implantées aux exutoires ;**

Les volumes ruisselés sont relativement modestes comparativement aux « *crues rapides* » du sud de la France. Les crues apparaissent aux exutoires de « *vallons secs* » ne présentant pas d'écoulement pérenne et à l'exutoire desquels les espaces urbanisés se sont développés sans connaître l'existence d'un tel risque. **Les dégâts sont systématiquement catastrophiques.** Ils se traduisent par des routes coupées, des ruptures du tablier routier, des voitures emportées, etc. **Les formes d'érosion témoignent de la compétence des écoulements qui deviennent suffisamment concentrés et volumineux pour induire des incisions majeures.**

La présentation proposée jusqu'à présent s'est appuyée sur une petite gamme d'épisodes tous localisés en Seine-Maritime et dans le Calvados. On propose d'élargir la zone d'étude en recensant toutes les « *crues rapides* » sur les régions du nord de la France (Haute-Normandie, Picardie, Nord-Pas-de-Calais). Le choix d'une si vaste zone d'étude doit permettre d'intégrer différents types de configurations (occupation du sol, pente, implantation humaine, climat) dans un espace (régions de plateaux) relativement homogène du point de vue géologique. On est, en revanche, restreint par une limite administrative puisque l'inventaire, proposé à partir de la base « *CatNat* » est un recensement réalisé à échelon départemental. L'analyse comparative entre ces **événements** doit aussi permettre de mieux comprendre l'origine et la variabilité spatiale et temporelle de ces phénomènes.

Chapitre 2

Les dossiers « *CatNat* » comme supports d'analyse pour un inventaire des « *crues rapides* »

Introduction	**p. 51**
2.1. Un inventaire basé sur la sinistralité	**p. 52**
2.2. Critiques des sources et limites des données	**p. 56**
2.3. Affiner la démarche d'inventaire des « *crues rapides* »	**p. 60**
2.4. Spatialisation des crues à échelle fine	**p. 64**
Conclusions du chapitre 2	**p. 71**

Jaulgonne (02) – 9 juillet 2000
Source : Dossiers « CatNat »

Introduction

Les sources pour réaliser un inventaire des inondations sont nombreuses et diversifiées : coupures de presse, archives, déclarations des particuliers, bases de données des assureurs… Plusieurs travaux ont montré l'intérêt de se baser sur des retours d'expérience (Garry, 1995 ; Gaume *et al.*, 2000 ; Antoine *et al.*, 2001 ; Vinet, 2003) ou sur une approche historique (Ballais et Ballais, 1994 ; Laganier, 2002; Agasse, 2005). Les bases de données peuvent être complétées par les informations tirées des journaux et des médias (Hay-Lepêtre, 2005), mais l'utilisation des sources journalistiques reste néanmoins sujette à caution (Agasse et Cador, 2006).

Les « *crues rapides* » apparaissant en périodes printanière et estivale n'ont toutefois jamais fait l'objet d'un recensement systématique sur l'ensemble des régions du nord de la France. **Une méthode d'inventaire a été spécifiquement mise en place** (Douvinet, 2006a). L'analyse des dossiers « *CatNat* », associés à la déclaration de la reconnaissance de l'état de « *catastrophe naturelle* », a pour but de recenser tous les événements qui ont donné lieu à des sinistres et aux déclarations corollaires. L'étude porte sur **huit départements** (Calvados, Seine-Maritime, Eure, Oise, Somme, Nord, Pas-de-Calais, Aisne). Une si vaste zone d'étude a été choisie pour intégrer toutes les configurations possibles dans un milieu sédimentaire relativement homogène, et pour avoir à disposition un échantillon de bassins suffisamment important pour dépasser le cadre monographique de la plupart des études précédentes.

La première étape permet de recenser les « *inondations reconnues entre mai et août inclus* » à partir de la base « *CatNat* » (§ 2.1.). La période d'étude s'est focalisée sur les quatre mois au cours desquels les orages sont considérés comme étant les plus violents. La deuxième étape conduit à la spatialisation de la base de données (§ 2.2.). Rapidement, des problèmes liés à la procédure de reconnaissance « *catastrophe naturelle* » et à la qualité des données initialement traitées vont remettre en cause la pertinence du premier inventaire réalisé (§ 2.3.). Il est alors indispensable de contrôler la base de données en consultant les informations associées à la base « *CatNat* » (§ 2.4.). Suivant la nature des informations recueillies, un inventaire complet et détaillé des zones sinistrées par les « *crues rapides* » peut finalement être proposé (§ 2.5.).

2.1. Un inventaire basé sur la sinistralité

2.1.1. Création d'une base de données « *Inondations et coulées de boue* » en périodes printanière et estivale dans les régions du nord de la France

Les événements indemnisés au titre de la reconnaissance officielle de l'état de «*catastrophe naturelle* » sont recensés depuis le 1er janvier 1983, dans la base de données statistique appelée « *CatNat* ». Le dispositif juridique de cette reconnaissance est plus amplement détaillé dans la circulaire du 19 mai 1998 et a été récemment complété par la loi Bachelot du 13 août 2004. La loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 oblige ainsi tous les particuliers à s'assurer contre les risques naturels (inondations, mouvements de terrain, éboulements, avalanches, séismes, … etc.) en ajoutant une prime à leur contrat d'assurance. Cette prime de cotisation additionnelle est passée de 9 % (1983) à 12 % (1999) suite à la recrudescence des événements de tempête et de grêle coûteux dans l'Ile de la Réunion (MEDD, 2003, 2005).

Dans cette base de données, l'inondation est considérée comme un phénomène coûteux et dommageable pour la société. Chaque reconnaissance fait référence à un événement qui a donné lieu à d'importants sinistres ; autrement dit, on travaille directement sur la **sinistralité des inondations** (Pigeon, 2002). Pour que l'inondation fasse l'objet d'un arrêté, l'intensité du phénomène pluvieux doit être reconnue comme « *anormale*» : l'intensité des pluies observées doit être **supérieure à la valeur décennale** calculée sur les données des stations à proximité des communes qui demandent l'état de *« catastrophe naturelle »*. Le cas échéant, les relevés des stations bénévoles, les données des particuliers et les images radar (dont la résolution est passé de 10 km² en 1986 à 1 km² en 2000) complètent les données des stations officielles qui ne se situent pas toujours sous les épicentres les plus pluvieux.

Parmi les items couverts par l'assurance « *dommages* » [1], seules les « *inondations et coulées de boue* » ont été sélectionnées (fig. 2.1.). Les autres items (« *inondations, coulées de boue et effets exceptionnels dus aux précipitations* », « *coulées de boue* ») n'ont pas été étudiés car ils font tous référence à des événements précis (22/01/1992 ; 25/12/1999). Les 56 655 reconnaissances des huit départements faisant partie de la zone étudiée ont été triées. Les épisodes apparus entre mai et août inclus ont ensuite été gardés. La période d'étude se focalise sur les quatre mois au cours desquels les orages sont reconnus comme étant les plus violents (Lherminez, 1998 ; Lemay, 2000). Les épisodes apparus au cours des autres mois ont volontairement été exclus de l'analyse, même si des orages peuvent survenir de manière précoce (21 avril 1991) ou plus tardivement (1er septembre 1987 ; 6 décembre 1999). Ces données ne représentent que 3 % de l'échantillon initialement gardé, ce qui justifie pleinement leur exclusion. Il reste finalement 3 568 déclarations communales (fig. 2.1.) qui constituent la base du premier inventaire.

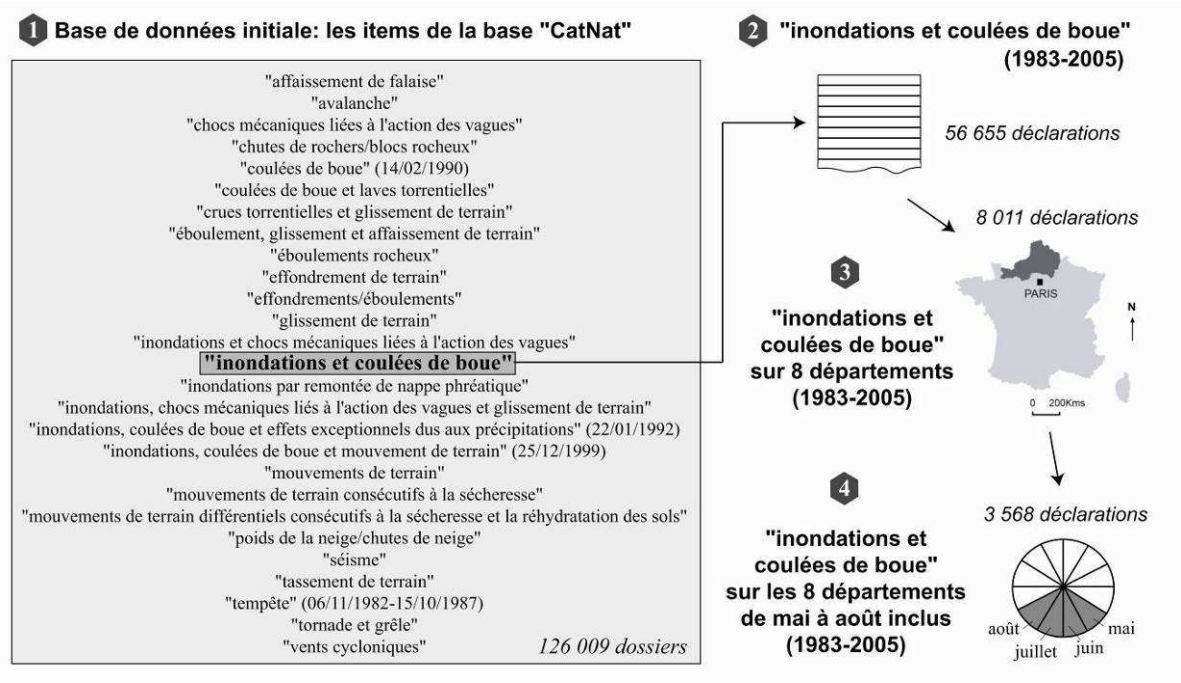


Fig. 2.1. Création de notre base de données à partir de la base « *CatNat* » (Douvinet, 2006a).

[1] Toutes les personnes qui possèdent pour leurs biens une assurance au titre de « *pertes d'exploitation* » ou « *dommages* » sont automatiquement couvertes en cas de dommages causés à ces biens dus aux « *forces de la nature* » : inondation, glissement de terrain, sécheresse, avalanche, tremblement de terre. Sont exclus depuis le 25 juin 1990 les dommages résultant des effets du vent liés aux tempêtes, aux ouragans et aux cyclones. La sécheresse devrait aussi prochainement disparaître de la procédure d'indemnisation, notamment à la suite des « *atermoiements de l'Etat face à l'indemnisation de la sécheresse de 2003* » qui met à jour certaines limites du système français, en particulier l'absence de réserves financières suffisantes pour couvrir une catastrophe majeure (MEDD, 2005).

2.1.2. Interprétation de la base « *CatNat* » et spatialisation des données

La base de données montre la sensibilité de plusieurs départements. Un rapport de 1 à 10 est utilisé (fig. 2.2.) pour faciliter la comparaison entre le nombre de déclarations et celui des dates d'événement. La Seine-Maritime est de loin la plus touchée : on comptabilise 720 communes inondées pour 42 épisodes sur la période 1983-2005, soit 17 communes sinistrées en moyenne par épisode. L'Aisne arrive en deuxième position avec 614 inondations pour 64 épisodes. Les épisodes sont plus nombreux mais ils affectent moins de communes. Ces deux départements forment un premier groupe. Un deuxième groupe est composé du Nord, de l'Oise et du Pas-de-Calais ; le nombre d'épisodes est compris entre 52 et 57, et le nombre de déclarations se situe aux alentours de 450. Les autres départements (Somme, Eure, Calvados) sont moins touchés et composent un troisième groupe de moindre sensibilité.

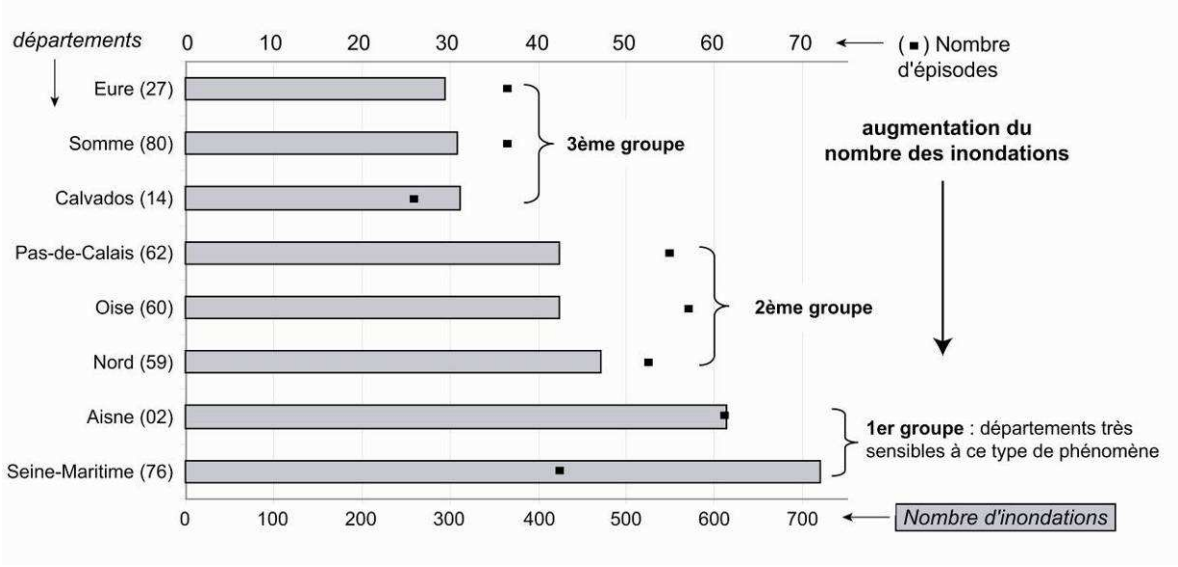


Fig. 2.2. Nombre de déclarations triées par département pour l'item « *inondations et coulées de boue* » recensées entre mai et août inclus sur la période 1983-2005 (Douvinet, 2006a).

Il faut toutefois **pondérer ces résultats** par rapport au nombre de communes et à la taille des départements afin de ne pas perturber l'interprétation spatiale. Les orages affectent ainsi une surface moyenne deux fois plus grande en Seine-Maritime (154 km²) que dans l'Aisne (74 km²) ou le Nord (80 km²), et près de trois fois plus que dans le Pas-de-Calais (53 km²).

Numéros des départements	**14**	**76**	**27**	**80**	**60**	**62**	**59**	**02**	**moyenne**
Nombre de déclarations entre mai et août inclus (A)	311	720	294	309	424	424	472	614	446
Nombre d'épisodes recensés (B)	26	42	36	36	57	55	52	61	45,6
Nombre de communes déclarées par épisode (A/B)	11,9	17,1	8,2	8,6	7,4	7,7	9,1	10,0	10,0
Nombre de communes par département (C)	704	745	675	783	693	894	653	816	/
Superficie totale de chaque département (km²) (D)	6 334	6 721	7 436	5 562	6 211	5 901	5 773	6 044	/
Surface moyenne touchée par épisode (km²) (D/C) * (A/B)	107	154,3	90,3	61,1	66,3	52,6	80,4	74,1	/

Tab. 2.1. Nombre d'épisodes et de déclarations entre mai et août d'après la base « *CatNat* ».

Les données ont ensuite été spatialisées sous SIG (Système d'Information Géographique) afin de mieux connaître la répartition spatiale des déclarations et des communes touchées. La carte permet d'identifier des secteurs où les déclarations sont les plus nombreuses. Ces zones d'impact sont considérées par Y. Le Bissonnais *et al*. (2002) comme des « *épicentres* » (fig. 2.3.), indiquant ici des zones de plus forte sensibilité aux « *inondations et coulées de boue* ».

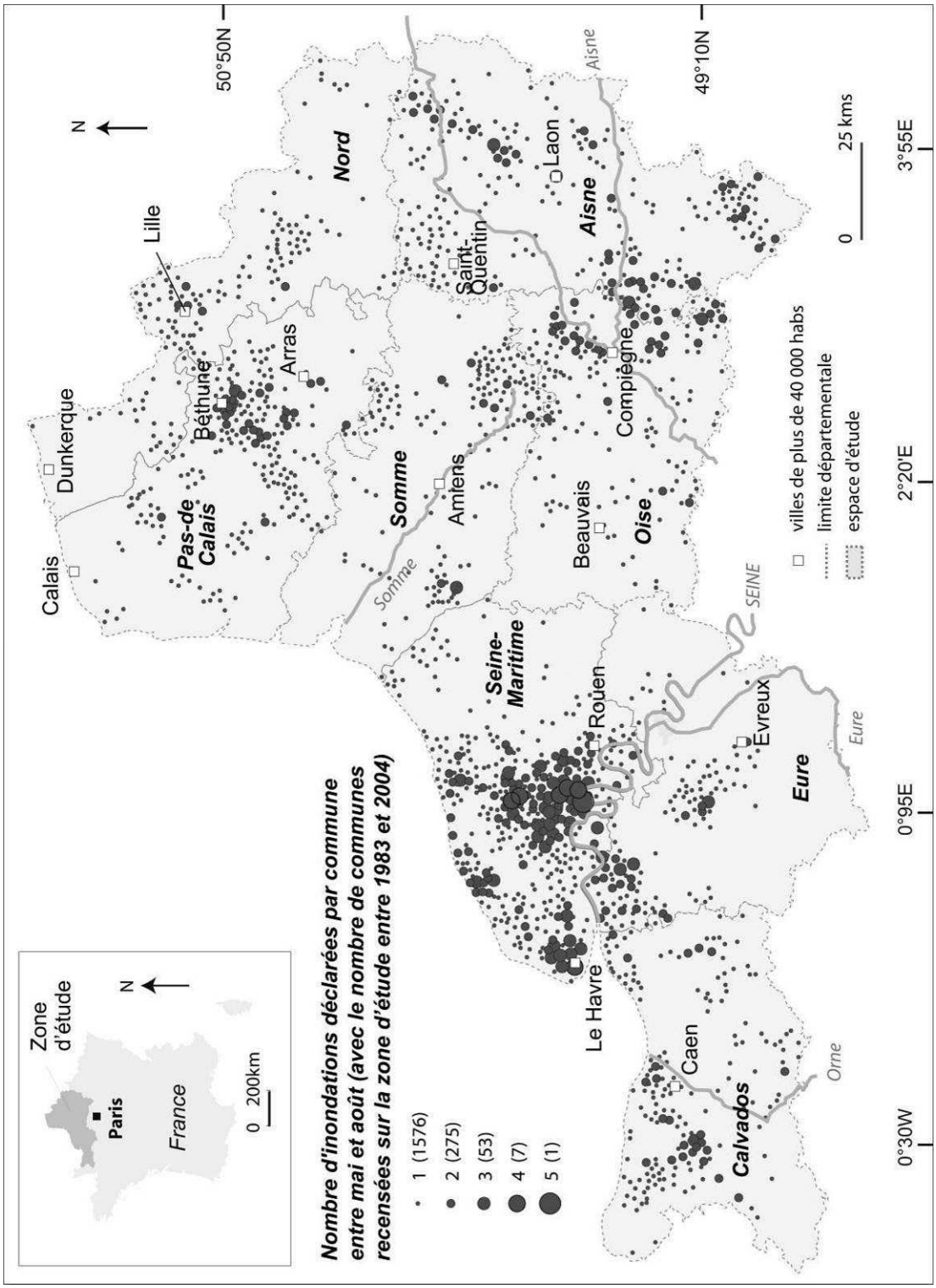


Fig. 2.3. Carte des « *Inondations et coulées de boue* » reconnues entre mai et août inclus et recensées entre 1983 et 2005 (Douvinet, 2006a).

L'ouest de la Seine-Maritime ressort bien comme le secteur le plus fortement touché. On recense toutes les communes où le nombre de déclarations est supérieur ou égal à 4 (fig. 2.3.). D'autres secteurs géographiques apparaissent de manière secondaire : les collines de l'Artois (au nord-ouest d'Arras) ; le Plateau Picard (au sud-est d'Amiens) ; le Vexin (au sud-ouest de l'Eure) ; le Tardenois (au sud de Laon) ; le Saint-Quentinois (au nord de Laon) ; le Valois et le Soissonnais (au sud de l'Aisne et à l'est de l'Oise) ; le Plateau de Neubourg (centre de l'Eure). Les communes y sont réparties de manière aléatoire et plus disséminée.

Des **problèmes** apparaissent néanmoins dès la première lecture de la carte :

- **une concentration des reconnaissances autour des plus grandes villes** (Compiègne, Béthune, Rouen, Le Havre). Ce constat peut s'expliquer par les plus forts taux de surfaces bâties de ces villes qui constituent autant de zones potentiellement vulnérables.

- des problèmes dus à la stagnation des eaux pluviales semblent faire ressortir les pôles miniers et urbains dans la région du Nord-Pas-de-Calais.

- les phénomènes « *crues rapides liées à des épisodes orageux* » sont masqués dans cet **item trop généraliste** « *inondations et coulées de boue* ».

A la lecture de ces premières observations, un bilan complet sur les limites d'utilisation et sur les précautions à apporter à l'interprétation scientifique de la base « *CatNat* » a été réalisé.

2.2. Critiques des sources et limites des données « *CatNat* » pour leur exploitation scientifique

Dès sa mise en place, la procédure de reconnaissance de l'état de « *catastrophe naturelle* » est reliée aux politiques de prévention des risques (MEDD, 2005). **La base de données sert au suivi des déclarations afin de cibler les communes où les arrêtés deviennent récurrents.** A partir des cartes réalisées au fil des années, des politiques d'aménagement devaient ensuite voir le jour pour diminuer la répétition des arrêtés sur les communes touchées. Des limites imputables aux objectifs réglementaires et à l'architecture de la base de données apparaissent pour cette étude, ce qui remet en cause l'exploitation scientifique initialement attendue.

2.2.1. Une prise de décision avant tout politique

Plusieurs doutes sont tout d'abord émis sur la scientificité de la prise de décision. Pour les inondations, la reconnaissance repose uniquement sur les « *intensités anormales des pluies* » (récurrence décennale), sans que soient pris en compte le coût des dommages matériels et humains, ou l'ampleur des zones inondées (Douvinet, 2006a). La reconnaissance est donc liée à une **décision politique** (Latruffe, 2000 ; Pottier, 2000 ; Dauphiné, 2001).

« *Le recours insuffisant à une expertise scientifique incontestable pour définir et caractériser les catastrophes naturelles* » remet en cause la pertinence de cette décision (MEDD, 2005). « *Comme ce caractère exceptionnel relève non pas d'un écart à une mesure, mais d'un jugement interministériel, cette définition n'a rien de scientifique : elle est d'ordre politique* » souligne Dauphiné (2001). **Cette situation d'incertitude explique la position de l'Etat qui est toujours à la recherche d'une synthèse (on devrait dire un compromis) entre les intérêts contradictoires des assureurs et des assurés, sans oublier ses propres intérêts et ceux des élus** (MEDAD, 2006).

2.2.2. Un seuil pluviométrique arbitraire pour des pluies orageuses

Le seuil d'intervention de la garantie est accordé si la pluie mesurée en 24 h dépasse la valeur décennale. Cette valeur paraît arbitraire pour des pluies orageuses de forte intensité car celles-ci présentent une grande variabilité spatiale et temporelle. Les stations du réseau officiel de Météo France ne se situent pas toujours sous les épicentres fortement pluviogènes. Les données de certaines stations bénévoles ou des particuliers sont, à l'inverse, surestimées. Les particuliers ont tendance à intensifier le phénomène, avec des cumuls sans doute réels mais dont la durée a été raccourcie dans le temps par rapport à la réalité (fig. 2.4.). L'imagerie radar n'est pas non plus toujours pertinente puisqu'elle peut parfois présenter d'importantes déficiences, comme ce fut le cas lors des pluies du 4 juillet 2005 [2].

La valeur décennale n'est pas non plus très significative. La qualification en terme de probabilité ou de période de retour par la méthode de renouvellement (ou par la loi GEV) nécessite de disposer des références régionales statistiquement valides (données recueillies sur plus de 30 ans). Or, cette démarche n'est valable que pour 31 % des 586 stations recensées sur l'ensemble de la zone d'étude. L'instruction CatNat du 15 février 2000 stipule par ailleurs qu' « *il n'est pas autorisé de fournir de durée de retour d'une précipitation sur un pas de temps inférieur à 1h et qu'il convient de considérer qu'elle s'est produite en 1h* » [3]. Or, cette restriction fait sans doute disparaître de la base de données des épisodes pour lesquels les dégâts liés à des inondations ont été importants : les 43 mm tombés en 30 mn le 23 juin 1984 sur la commune de La Chapelle (60) ou les 40 mm tombés en 50 mn le 22 juillet 2004 à Tupigny (02) n'ont pas fait l'objet d'une reconnaissance car les intensités, une fois rapportées à l'échelle horaire, sont repassées en dessous de la valeur décennale comprise entre 45 et 50 mm en 24 h.

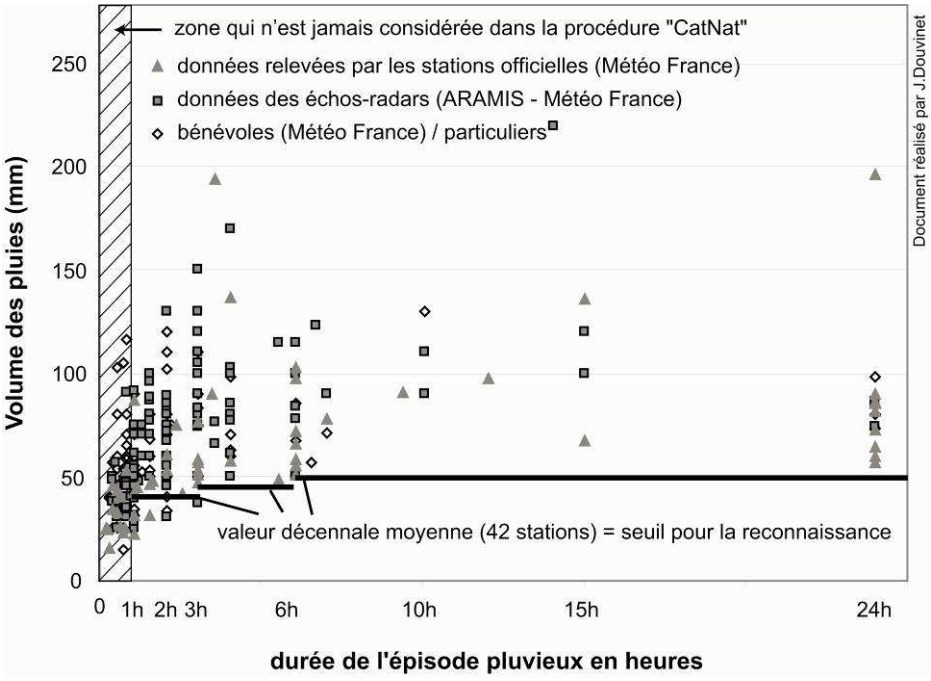


Fig. 2.4. Cumuls et durées des pluies à l'origine des « *crues rapides* » associées à des épisodes orageux (1983-2005) et seuils utilisés pour la reconnaissance de l'état « *catastrophe naturelle* ».

[2] Des cellules orageuses actives ont été masquées à cause de la présence d'un écran nuageux entre la station radar et la zone concernée (Béthune), se conjuguant avec l'éloignement de la station radar en limite de portée climatologique.
[3] D'après l'article M de la récente loi du 13 août 2004 portant sur la modernisation de la sécurité civile (MEDAD, 2006).

2.2.3. Des problèmes liés à l'architecture de la base de données

D'autres problèmes sont directement imputables à la structure de la base de données :

L'item « *inondations et coulées de boue* » regroupe des processus hydrologiques distincts : des problèmes de ruissellements (urbains, ruraux) se retrouvent associés à des débordements de cours d'eau, à des crues instantanées ou à des saturations des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. On ne peut donc pas connaître avec précision quels sont les épisodes orageux qui ont réellement déclenché des « *crues rapides* » en travaillant sur cet item généraliste.

Les dégâts liés aux tempêtes et à la grêle se retrouvent mêlés avec les dommages liés aux inondations (fig. 2.5.). Normalement, ces dégâts sont exclus du régime « *CatNat* » car ils sont couverts par les assurances privées depuis le 25 juin 1990. La majorité des dommages pour les communes reconnues en état de « *catastrophe naturelle* » à la suite des épisodes du 14 août 1985, du 23 juillet 1988 (mort de 2 personnes), du 4 juillet 2005 (épisodes de tempête) ou du 24 juillet 1993 et du 6 juin 1998 (épisodes de grêle) se retrouvent pourtant dans cet item « *inondations et coulées de boue* » alors que la plupart des dégâts sont liés aux effets combinés du vent et de la grêle. Il est donc bien délicat de faire le tri entre tous les dommages.

L'avis favorable est rapporté à l'échelon communal, ce qui pose plusieurs problèmes. En effet, les inondations concernent souvent une petite partie de la commune et non la totalité. Par ailleurs, il existe sans doute une **« prime à l'événement majeur » :** lorsqu'une commune est fortement sinistrée, toutes les communes qui font la demande de reconnaissance ont sans doute plus de chance de se faire reconnaître. Cet effet d'agrégation masque les disparités des dégâts qui, de toute façon, ne sont pas pris en compte lors de la prise de décision de l'arrêté. Il est par ailleurs impossible de connaître les entités fonctionnelles qui ont induit les épisodes inondants. La commune de Barentin (76) a, par exemple, été reconnue pour les événements du 10 mai 2000, mais en réalité ce sont cinq petits vallons situés en rive droite de la vallée de l'Austreberthe qui sont à l'origine des « *crues rapides* ». Le coût et la localisation des sinistres devraient alors être pris en compte dans le cadre de la procédure « *CatNat* ».

Quant à la valeur des pluies, elle n'est pas généralisable sur l'ensemble des communes qui demandent la reconnaissance. Il est intéressant de souligner la proposition d'E. Biwer en vue d'une réforme du système d'indemnisation : une définition de la catastrophe à l'échelle de la zone constatée comme affectée, soit à une échelle infra-communale (MEDD, 2005).

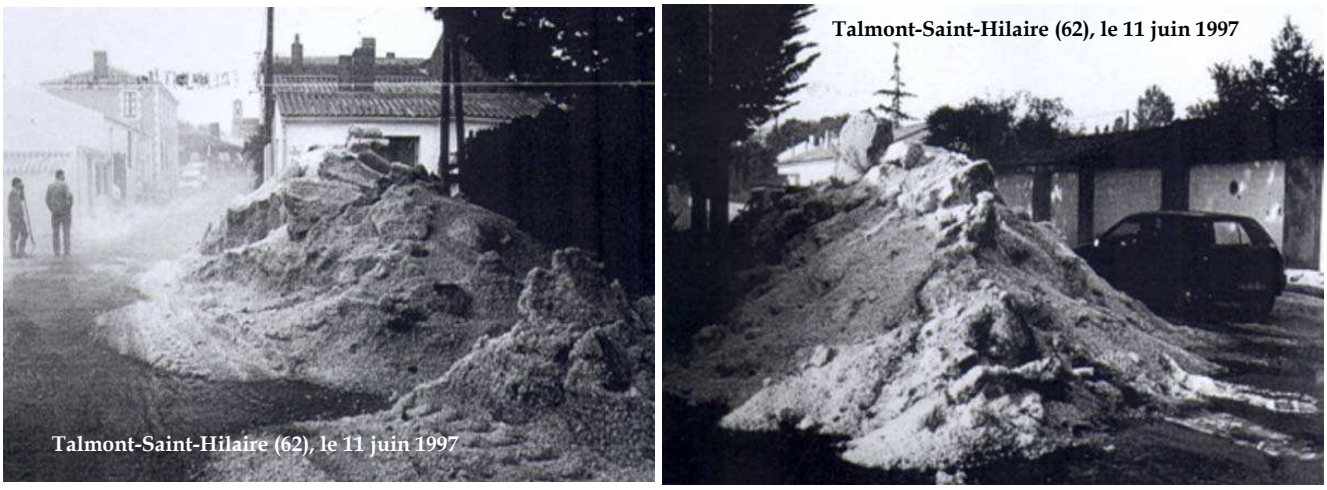


Fig. 2.5. Dommages liés à des épisodes de grêle (photos issues des dossiers « *CatNat* »).

A ces nombreux problèmes s'ajoutent des éléments dont les effets sur la structure de la base de données sont impossibles à mesurer. Les rapports et les changements de mentalités des élus face au régime d'indemnisation depuis les années 1980 sont très souvent évoqués (Latruffe, 2000 ; Pottier, 2000 ; MEDD, 2003, 2005 ; Pigeon, 2002, 2003 ; Hay-Lepêtre, 2005). La méconnaissance de la procédure a conduit au départ de nombreuses communes à ne pas réaliser un dossier d'indemnisation ; les maires ne voyaient pas non plus l'utilité de déclarer leur commune en cas de sinistres. En relation avec le développement des Plans d'Exposition des Risques (PER), certains maires voyaient dans cette démarche l'arrivée de contraintes supplémentaires pour le développement de leur commune.

Les catastrophes du Grand Bornand (1987), de Nîmes (1988) puis de Vaison-la-Romaine (1992) ont ensuite remis à l'ordre du jour la prise en compte des inondations. La pression des particuliers a largement été véhiculée - et incitée - par les médias. En 1995, plusieurs mesures vont, de nouveau, changer la perception des élus face à ce régime d'indemnisation. La mise en place d'un système de franchises imposé par la Caisse Centrale de Réassurances (CCR) va freiner les demandes et les événements mineurs ne sont désormais plus déclarés. En 2000, le Code des Assurances a aussi été modifié. La franchise est modulée en fonction du nombre d'arrêtés pris pour le même risque sur les cinq années précédant la demande d'arrêté : quand la commune a x arrêtés, la franchise est désormais multipliée par $x - 1$.

La base « *CatNat* » est directement affectée par tous ces changements connus mais dont les conséquences ne sont pas mesurables. **Elle ne peut, en tous cas, dans le cadre de notre étude, servir de base de données statistique fiable sans la moindre modification**.

2.2.4. Des procédures d'indemnisation parallèles

Plusieurs démarches se substituent à la procédure de reconnaissance « *CatNat* ».

Lorsque les dégâts sont d'une ampleur telle que des solutions doivent être apportées le plus rapidement possible aux démunis, il est possible que l'Etat fasse appel au *Fond de secours d'extrême urgence aux victimes des calamités publiques*. Le terme « *calamités publiques* » désigne les cataclysmes naturels ou événements qui ont entraîné la destruction des biens meubles ou immeubles avec une gravité exceptionnelle. Ce crédit a été ouvert pour la première fois au budget du Ministère de l'Intérieur par la loi du 12 avril 1972 (MEDD, 2005). Les sommes distribuées constituent des **secours** et non **pas une indemnisation totale ou même partielle des pertes subies.** Les sinistrés ne peuvent se prévaloir d'un droit à la réparation des dégâts : ce sont des secours d'extrême urgence qui ont pour objet d'aider les bénéficiaires à faire face à des besoins vitaux (nourriture, logement). **Ce sont des secours individuels réservés aux personnes démunies se trouvant dans une situation difficile au lendemain d'un sinistre.**

La procédure peut être demandée à **titre individuel** (pour un pavillon sinistré), à **titre communal** (demande de la commune de Bourguignon sous Coucy (02) pour les dégâts liés à des pluies extrêmes estimées à 90 mm en 40 mn le 7 juillet 2000), **ou à titre départemental** (la tempête du 23 juillet 1990 pour la totalité du département de l'Essonne). Quoi qu'il en soit, les communes qui font cette démarche sortent automatiquement de la base de données ; elles sont donc exclues dans l'inventaire proposé dès le départ.

D'autres procédures de remboursement peuvent aussi faire disparaître des communes touchées lorsque la majorité des biens ne sont pas des biens personnels. Si la plupart des biens dégradés sont **d'ordre public**, une subvention particulière est attribuée par le Ministère

de l'Intérieur, plus exactement par la Sous Direction des Finances Locales et des Cultures Publiques au sein de la Direction Générale des Collectivités Locales (DGCL). Lorsque les dégâts sont des **biens agricoles** (récoltes non engrangées, cultures, sols et cheptel vif hors bâtiment), l'indemnisation est régie suivant les dispositions des articles L361-1 à L361-21 du Code Rural et la loi 64-706 du 10 juillet 1964. Le bureau des Calamités Agricoles (qui dépend aujourd'hui du bureau Crédit Assurances, sous le Ministère des Finances, et qui dépendait autrefois du Ministère de l'Agriculture) réalise un dossier portant sur le montant exact des **dommages** et des **pertes en terre.** L'indemnisation est basée sur une expertise agricole de la DDAF et sur un barème départemental qui fixe le prix des remboursements en fonction du prix des cultures : 20 % des pertes agricoles sont généralement remboursés, dont 25 à 30% de l'indemnisation sont directement assurés par le Bureau des Calamités Agricoles.

Toutes ces procédures complémentaires peuvent suppléer la procédure « *CatNat* » et faire disparaître des inondations qui, néanmoins, auraient provoqué des sinistres importants.

2.3. Affiner la méthode d'inventaire des « *crues rapides* »

2.3.1. Contrôle des données et informations associées

La qualité du premier inventaire a été contrôlée en consultant les informations associées aux dossiers « *CatNat* ». **L'objectif ici est de ne garder que les « *crues rapides* » liées à des pluies de forte intensité.** Les dossiers, présentés devant la Commission Interministérielle qui statue sur la prise de décision, sont archivés à la DDSC (Direction de la Défense et Sécurité Civiles), antenne du Ministère de l'Intérieur (Asnières), et au CAC, Centre des Archives Contemporaines (Fontainebleau) dans des cartons (*dimabs*). Les dossiers sont cependant protégés ; ils ne sont communicables au public qu'à l'expiration d'un délai de 30 ans, conformément aux conditions prévues par la loi sur les archives du 3 janvier 1979.

Afin de pouvoir consulter ces dossiers, une convention « *Recherche* » a été signée entre le Ministère de l'Intérieur (DDSC), les Archives de France (CAC) - auxquels se sont associées les Archives Nationales – et le Ministère de la Culture (mission Patrimoine), conformément aux règles de communication des archives publiques. L'analyse des rapports techniques compilés dans les dossiers a permis de récolter les informations suivantes (fig. 2.6.) :

- les demandes de reconnaissance indiquent les **estimations financières des dommages**, la **nature du sinistre**, les dates des précédents arrêtés et les mesures de prévention prises par la commune (travaux, aménagements, Plan de Prévention des Risques).

- les rapports circonstanciés des maires détaillent le **déroulement du sinistre** à partir de leur propre expérience ou d'après les témoignages de plusieurs habitants. Les comptes-rendus sont subjectifs mais la description de l'événement permet de voir son ampleur.

- le rapport météorologique de Météo-France fournit les **intensités de pluies** relevées par les stations officielles, les données bénévoles et les lames d'eau estimées par les échos-radars (plus précises pour les épisodes apparus depuis 2000). Les périodes de retour des pluies observées sont calculées par rapport aux courbes Intensité/Durée/Fréquence des stations de référence les plus proches. L'expert peut refuser de statuer sur l'arrêté si les stations sont trop éloignées des zones sinistrées, ou si des pièces manquent au dossier, comme par exemple les images radars, qui restent la propriété de Météo France.

- le rapport de la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) fournit des **données** hydrométriques quand des stations de mesure ont enregistré des variations sur les cours d'eau équipés. Ces enregistrements n'ont pas été utilisés car ils existent uniquement pour les grands cours d'eau, et non pour les petits bassins auxquels on s'intéresse ici.

- le rapport de la Direction Départementale de l'Equipement (DDE) donne une estimation financière des **dégâts subis sur les réseaux d'évacuation**, les **routes** et les **canalisations**.

- un « *fonds de dossier* » contient des **informations complémentaires** suivant la gravité de l'événement : des rapports de la gendarmerie et des services départementaux d'incendie et de secours (SDIS ou CODIS), où sont indiqués les lieux d'interventions et la nature des dégâts ; des coupures de presse ; des factures mentionnant le montant des sinistres de certains particuliers ; des photographies des dommages envoyées par les particuliers ; et parfois, des cartes où sont indiqués les zones inondées et le sens des écoulements.

La base de données a ainsi été contrôlée en analysant les informations issues des rapports techniques ; tous les événements qui ne correspondent pas à des « *crues rapides* » sont exclus de cette analyse. La méthode (fig. 2.6.) complète les premiers traitements initialement réalisés (fig. 2.1.). On verra ensuite l'importance de ce second traitement (§ 2.5.).

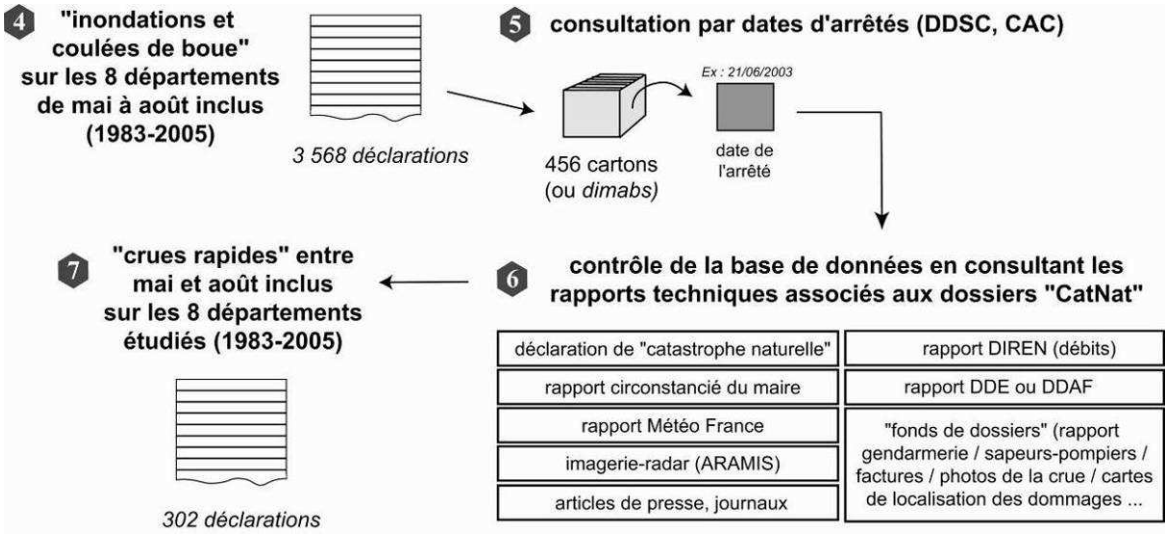


Fig. 2.6. Apports des rapports techniques et création de la seconde base de données.

2.3.2. Lieux et durées d'archivage des dossiers « *CatNat* »

Les dossiers « *CatNat* » ne sont pas tous conservés au sein des mêmes institutions suivant la date de la « *catastrophe naturelle* » reconnue. Ces informations nous semblent importantes à mentionner ici car la démarche d'inventaire pourrait être transposable à d'autres types de risques. Les dossiers sont conservés au sein des différents services du Ministère de l'Intérieur pour une durée de 5 ans, à compter du dépôt des demandes déposées par la Préfecture. Une fois passé ce délai, les archives sont ensuite versées en pré-archivage au sous-sol de la DDSC (Annexe 2.1.), à Asnières-sur-Seine, pour une durée de 5 ans. Le versement est finalement transféré au titre des « *archives historiques* » au Centre des Archives Contemporaines (CAC) de Fontainebleau (CAC), dix ans après son officialisation (Annexe 2.2.).

Dans le cadre de la convention « *recherche* », la procédure de dérogation a permis l'accès i) à l'ensemble des dossiers des Commissions CatNat, ii) à l'ensemble des dossiers conservés par la cellule « *Archives* » de la DDSC (à Asnières) et iii) à tous les dossiers conservés au CAC (à Fontainebleau). Les épisodes compris entre 1983 et 1996 ont été consultés à Fontainebleau et ceux entre 1997 et 2005 inclus ont été consultés au sein même de la DDSC.

Les dossiers des demandes de reconnaissance de l'état de « *catastrophe naturelle* » instruits par les commissions interministérielles sont rangés dans des *dimabs* (ou cartons), qui ont une durée de communicabilité de 30 ans d'après l'article 6 de la loi sur les Archives n°79-18, voire plus selon le type d'information contenu dans les dossiers. Dans chaque *dimab,* l'organisation des dossiers respecte le classement établi par le correspondant de la cellule « *Catastrophes naturelles* » : par ordre chronologique des commissions, et à l'intérieur de chaque dossier, par numéro minéralogique des départements. En revanche, chacun des *dimabs* a été archivé par date de versements et non par date des arrêtés. La cote d'un versement contient l'année du versement, le numéro d'archivage et le nombre de cartons (tab. 2.2). Les cotes des versements sont disponibles sur la base de données *PRIAM3* des Archives Nationales (accès sur Internet).

Cote du versement	Lieu d'archivage	Nature des dossiers
19920176, Art. 1-45, 66-68	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1982-1986.
19930453, Art. 1-114	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1987-1990.
19960326, Art. 1-146	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1982-1990
19970284, Art. 1-72	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1992-1993
19990013, Art. 1-50	Fontainebleau (CAC)	- Dossiers généraux (1962-1973), - Procédure de reconnaissance (1977-1992) - Indemnisation des victimes (1977-1992).
19990171, Art. 1	Fontainebleau (CAC)	Album photo cyclone Firinga (Réunion, 1989).
20030389, Art. 1-46	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1993-1994
20050076, Art. 1-45	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1994-1995
20050078, Art. 1-9	Fontainebleau (CAC)	Compléments de dossiers, 1995
20050507, Art. 1-47	Fontainebleau (CAC)	Dossiers de la commission, 1996.
19900003, Art. 1-10, 20000004, Art. 1-10, 20000005, Art. 1-9.	Asnières (DSSC)	Dossiers de la commission, 1997 (versement aux Archives Nationales en 2007).
20000007, 8, Art. 1-10, 200000011, 12, 13, Art. 1-10	Asnières (DSSC)	Dossiers de la commission, 1998.
200000033, 35, 36, Art. 1-10 200000034, Art. 1-8,	Asnières (DSSC)	Dossiers de la commission, 1999.

Tab. 2.2. Cotes des versements consultables au CAC (Fontainebleau) et quelques exemples de pré-versements consultables sur la base PRIAM3 à la DDSC (Asnières).

Les dossiers conservés à la DDSC distinguent aussi la nature du processus (inondations, mouvements de terrain, coulées de boue). La DDSC a créé sa propre base de données où sont enregistrés tous les pré-versements avec les dates des arrêtés, celles des commissions et le type de« *catastrophes naturelles* ». Les pré-versements sont plus nombreux à la DDSC mais ils seront regroupés lors des versements aux Archives Nationales (tab. 2.2.). En faisant une présélection à partir des registres mentionnant les dates des épisodes et les numéros des départements concernés par les reconnaissances, les **3 568 dossiers ont tous été contrôlés.**

2.3.3. Bilan : les étapes incontournables de la méthode d'inventaire

La figure suivante fait la synthèse de toutes les étapes nécessaires à la construction de la base de données « *crues rapides* » apparues entre mai et août inclus et ayant donné lieu à des reconnaissances de l'état de « *catastrophe naturelle* » (fig. 2.7.). Elle suit le cheminement mené depuis l'analyse de la base « *CatNat* » jusqu'à la réalisation du second inventaire.

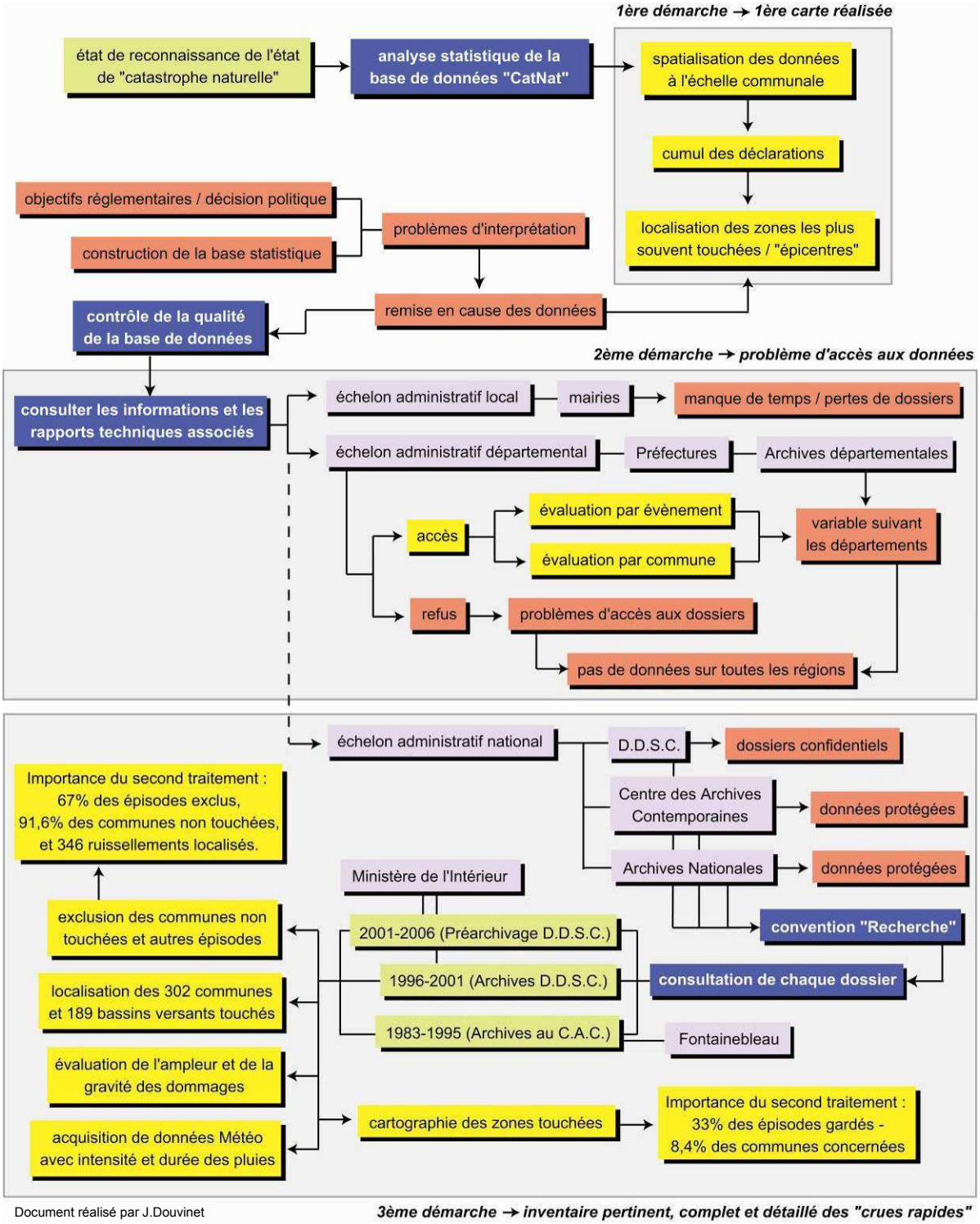


Fig. 2.7. Les étapes nécessaires pour un inventaire détaillé et précis des « *crues rapides* ».

La démarche se veut originale pour un risque spécifique et peu facile à recenser. Cette méthode d'inventaire peut sans doute être transposée à d'autres types de risques, comme les mouvements de terrain ou les submersions de tempête par exemple. **Les résultats obtenus permettent de mesurer toute l'importance de la démarche proposée et ils montrent surtout à quel point la base « *CatNat* » doit être utilisée avec précaution.**

2.4. Spatialisation des « *crues rapides* » à échelle fine

2.4.1. Distinctions entre « *ruissellements localisés* » et « *crues rapides* »

L'inventaire permet tout d'abord de distinguer les problèmes de ruissellements localisés, qui sont des inondations liées à du ruissellement rural et à une très forte proximité spatiale entre les surfaces cultivées et les espaces urbanisés, et les « *crues rapides* » aux conséquences plus dramatiques (Douvinet, 2006a). Les phénomènes de ruissellement (346) correspondent à des **problèmes mineurs** qui donnent lieu à des dépôts boueux de quelques centimètres, ou – la plupart du temps – à des inondations de caves. Les dégâts associés sont généralement peu coûteux. Ces problèmes se répartissent sur l'ensemble de la zone d'étude (fig. 2.10.). Dans certains cas, il a été difficile de statuer entre un ruissellement localisé ou une « *crue rapide* » accompagnée de dégâts de faible ampleur. Le fait d'analyser des événements anciens à partir de rapports techniques, photos, articles de presse, rapports circonstanciés des maires est une étape délicate, voire subjective (Laganier, 2002 ; Meschinet de Richemond, 2003). **Un retour terrain a été effectué sur la totalité des 189 bassins touchés par une « *crue rapide* » afin de valider la pertinence de cette seconde base de données.**

Des ruissellements localisés et des « *crues rapides* » peuvent apparaître sur le même bassin. Pour s'en convaincre, il suffit d'étudier l'exemple du bassin versant d'Estreux (59) (fig. 2.8.).

Fig. 2.8. Quelques photos des dégâts et estimations des niveaux probables atteints lors de la crue rapide du 7 juin 2007 sur le bassin versant d'Estreux (59) (Douvinet *et al.*, 2008).

Plusieurs ruissellements localisés ont déjà eu lieu sur ce bassin de 6,5 km² (1994, 2001). **Entre 1983 et 2005, tous les événements correspondaient à des problèmes de ruissellement localisés**. Suite aux importantes inondations observées dans une cuvette située en aval du centre ville en 2001, une pompe avait d'ailleurs été installée (fig. 2.8C). Toutefois, la *« crue rapide »* qui a touché Estreux le 7 juin 2007 a été particulièrement **violente**, suite à des pluies orageuses estimées à 100 mm et tombées en 2 h environ. Les hauteurs maximales des laisses de crues se situent à près de 1,70 m dans le centre ville (fig. 2.8B') et à plus de 1,90 m dans la zone de cuvette située en aval (fig. 2.8C). La reconstitution des niveaux d'eaux probables doit être considérée avec précaution, notamment à cause des remous à la surface des écoulements (fig. 2.8B'). **Elle matérialise toutefois l'ampleur de cette crue du 7 juin 2007 qui, à la lecture des dégâts et suite aux observations de terrain, entre dans la catégorie « *crues rapides* ».**

2.4.2. Importance du second traitement

Cette seconde approche améliore considérablement l'analyse statistique initiale. L'accès aux rapports techniques et aux informations contenues dans les dossiers **corrige les erreurs de la base de données, et apporte surtout un « *regard d'expert* » sur la prise de décision.**

Les « *crues rapides* » sont désormais distinguées des autres inondations comptabilisées dans l'item « *inondations et coulées de boue* ». Les communes recensées comme *« touchées »* sont celles qui ont réellement subi des dégâts causés par des écoulements rapides et brutaux à la suite de pluies de forte intensité en périodes printanière et estivale.

Au final, on garde **33 % des épisodes initialement sélectionnés**, soit 121 épisodes sur les 365. Les écarts entre les départements sont importants : 82 % des épisodes reconnus en Seine-Maritime sont gardés alors que 8 % et 12 % d'entre eux le sont pour les départements du Nord et du Calvados (tab. 2.3.). Ces résultats confirment une supposition qui avait été émise au départ de cet inventaire. Beaucoup d'épisodes reconnus en Seine-Maritime ont donné lieu à des phénomènes *« crues rapides »*. En revanche, dans les départements du Calvados et du Nord, la plupart des épisodes pluvieux de forte intensité ont provoqué des problèmes de ruissellement rural et/ou urbain, et des stagnations d'eaux pluviales (tab. 2.3.).

Numéros des départements	**14**	**76**	**27**	**80**	**60**	**62**	**59**	**02**	**moyenne**	**total**
Nombre d'épisodes recensés au départ (B)	26	42	36	36	57	55	52	61	45,6	365
Episodes du type *« crues rapides »* (E)	3	36	8	9	16	20	4	25	14,9	121
Pourcentage d'épisodes conservés (E/B)	12 %	82 %	22 %	24 %	28 %	36 %	8 %	41 %	33,1 %	/
Déclarations entre mai et août au départ (A)	311	720	294	309	424	424	472	614	446	3568
Déclarations conservées pour les *« crues rapides »* (F)	7	93	27	13	37	54	8	63	36,5	302
Pourcentage de déclarations conservées (F/A)	2 %	13 %	9 %	4 %	9 %	13 %	2 %	10 %	8,4 %	8,4 %
Pourcentage de communes conservées (F/ somme F)	2 %	31 %	9 %	4 %	12 %	18 %	3 %	21 %	12,5 %	100 %

Tab. 2.3. Résultats obtenus après l'analyse détaillée des dossiers « *CatNat* » (Douvinet, 2006).

La sélection est encore plus significative à l'échelon communal. Le nombre de communes touchées passe de 3 568 à 302. **On retient 8,4 % des communes initialement comptabilisées.** Les écarts vont de 2 % pour le Nord et le Calvados, à 13 % pour la Seine-Maritime et le Pas-de-Calais. La Seine-Maritime ressort de nouveau comme la plus sensible, avec 93 communes inondées, soit 31 % de l'échantillon. L'Aisne et le Pas-de-Calais regroupent 21 % et 18 % des communes touchées. Associés, ces trois départements regroupent 70 % des bassins versants. Les écarts entre les départements semblent se réduire. Plusieurs hypothèses sont émises :

- d'un côté, il est sans doute plus facile pour les communes des départements les moins touchés de se faire reconnaître en état de « *catastrophe naturelle* ». Dans ce cas, un **souci d'équité** en matière d'aménagement lisserait les disparités régionales ;

- d'un autre côté, la totalité des demandes est probablement accordée lors des épisodes violents : soit en raison d'un manque de tri parmi toutes les demandes ; soit à cause de la généralisation des données de pluies sur les communes environnantes. Dans ce cas, les effets d'une certaine « *prime à l'événement majeur* » sont démontrés ;

- par ailleurs, il existe un **potentiel de risque** variable suivant les départements. Dans un département régulièrement touché (la Seine-Maritime par exemple), la notion de « *risque minimum* » est plus élevé que dans un département moins touché (Calvados, Nord).

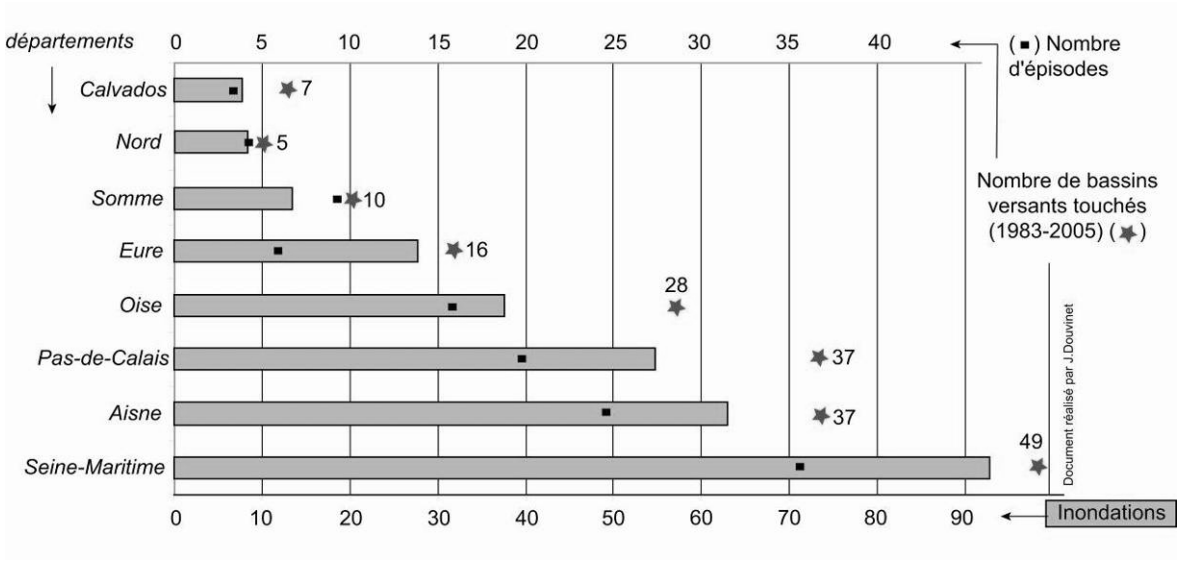


Fig. 2.9. Nombre d'épisodes, de communes et de bassins touchés par des « *crues rapides* ».

2.4.3. Cartographie des bassins versants touchés (1983-2005)

Les « *crues rapides* » ont été spatialisées à l'échelle des « *bassins versants touchés* » afin de s'affranchir de l'échelle communale. Ces entités correspondent aux surfaces situées en amont des communes sinistrées. Les politiques engagées par les pouvoirs publics et les recherches menées ces dernières années ont montré la nécessité de gérer les inondations à l'échelle du bassin versant (échelle globale) et non à celle, plus locale, du tronçon de rivière (Bethemont *et al.*, 1996 ; Cosandey, 2003 ; Douvinet et Agasse, 2006). Un rapport de 1 à 2 a été utilisé pour comparer le nombre de communes inondées et le nombre de bassins touchés (fig. 2.9.). Les « *crues rapides* » sont donc bien plus localisées puisqu'un rapport de 1 à 10 (fig. 2.2.) avait été précédemment utilisé pour comparer le nombre de déclarations aux épisodes reconnus.

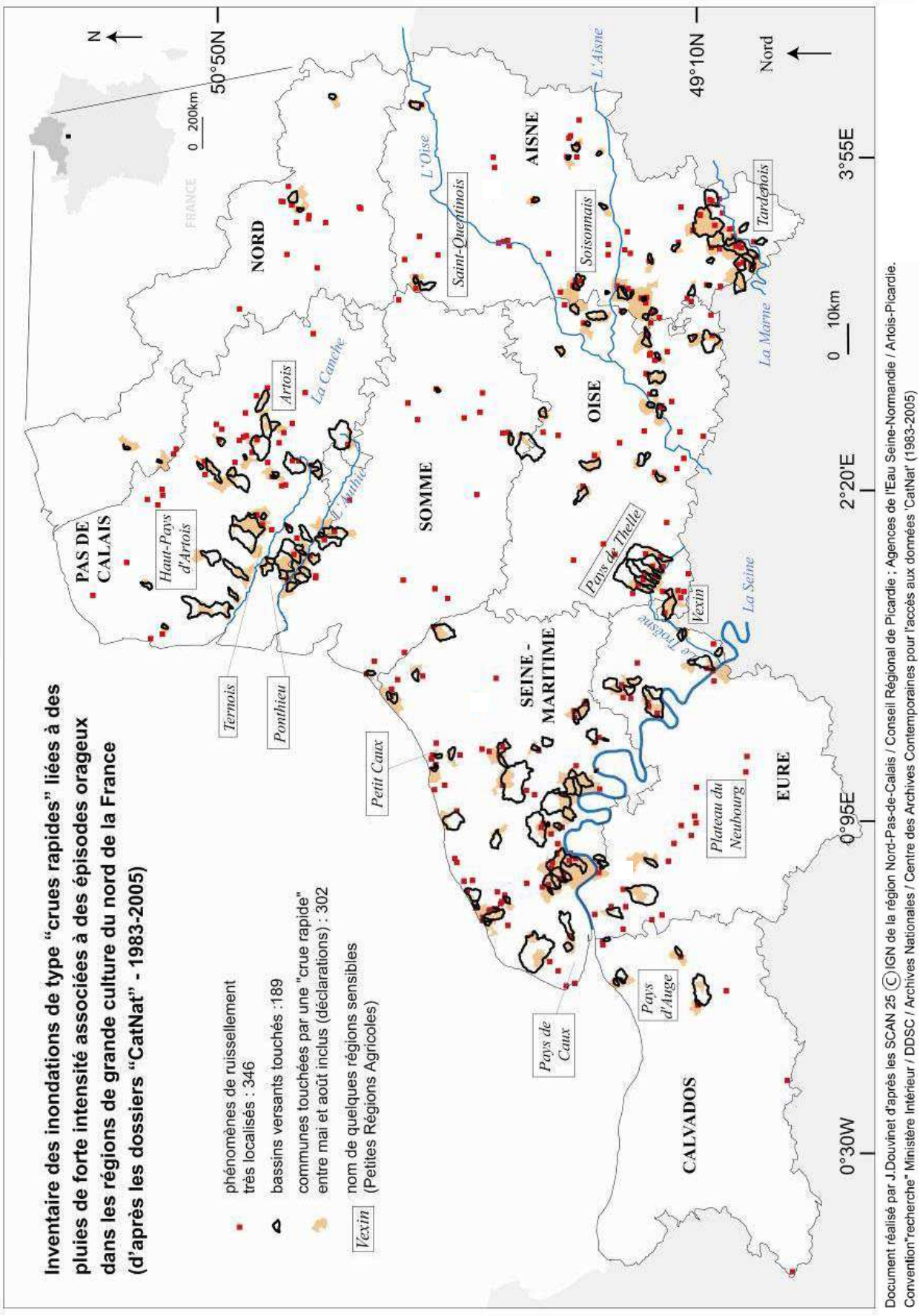


Fig. 2.10. Localisation des bassins versants touchés par une « *crue rapide* » liée à de fortes pluies en périodes printanière ou estivale et problèmes de ruissellement localisés.

189 bassins versants touchés ont été identifiés ; ils se localisent en premier lieu en Seine-Maritime (49), dans l'Aisne (37) et le Pas-de-Calais (37), dans l'Oise (28) et dans une moindre mesure dans l'Eure (16), la Somme (10), le Calvados (7) et le Nord (5). La répartition spatiale démontre une plus forte sensibilité dans le Pays de Caux, les collines de l'Artois, le Pernois, le Valois, le Vexin normand, le Ponthieu et la partie méridionale du Tardenois. Les bassins versants ont des surfaces plus petites dans l'Aisne (6,9 km² en moyenne) que dans l'Oise et la Seine-Maritime (11 ,5 km² et 11,9 km²), le Pas-de-Calais et la Somme (tab. 2.4.). Cette seconde carte ressemble à la première carte car les noyaux précédemment identifiés sont de nouveau mis en avant. Ce constat confirme surtout que **la reconnaissance englobe un certain nombre de communes situées à proximité des zones les plus fortement touchées.**

Des configurations spatiales originales semblent ressortir sur la carte : **certains bassins se situent le long des vallées encaissées de plusieurs cours d'eau principaux** (la Seine et la Marne) **et secondaires** (la Risle, l'Authie, la Canche, le Troësne). Ces résultats confirment une hypothèse déjà avérée en Seine-Maritime (Delahaye, 2002 ; Douvinet *et al*., 2006a), à savoir la sensibilité de vallons à fortes pentes situés en aval de plus grands bassins versants.

Les surfaces cumulées des bassins versants touchés par département donnent une idée de la taille des surfaces affectées : 563 km² en Seine-Maritime, 476 km² pour le Pas de Calais, (tab. 2.4.). Ces valeurs ont été rapportées à la superficie totale des départements pour faciliter la comparaison. 8,4 % du territoire de la Seine-Maritime a été affectée par des « *crues rapides* » sur la période d'étude, en sachant que certains bassins ont parfois été touchés plusieurs fois. Avec une surface plus petite, le pourcentage de territoire touché sur le Pas-de-Calais est relativement proche (8,1 % du territoire). L'Oise (5,4 %) et l'Aisne (4,5 %) sont un peu moins affectés. Les autres départements ont des valeurs très faibles en regard du nombre de bassins recensés : 2,4 % pour l'Eure, 0,8 % pour le Calvados, 0,3% pour le Nord.

Numéros des départements	**14**	**76**	**27**	**80**	**60**	**62**	**59**	**02**	**total**
Nombre de bassins versants touchés (G)	7	49	16	10	28	37	5	37	189
Superficie totale touchée par département (km²) – cumul des bassins versants touchés (H)	54	563	177	130	334	476	14	270	1 988
Superficie moyenne par bassin (km²) (H/G)	7,7	11,5	11,1	13	11,9	12,9	2,8	6,9	10,5
Superficie totale du département (km²) (D)	6 334	6 721	7 436	5 562	6 211	5 901	5 773	6 044	50 015
Pourcentage de chaque département touché par des *« crues rapides »*	0,8 %	8,4 %	2,4 %	2,3 %	5,4 %	8,1 %	0,3 %	4,5 %	4,0 %

Tab. 2.4. Nombre d'épisodes et bassins versants touchés par des « *crues rapides* ».

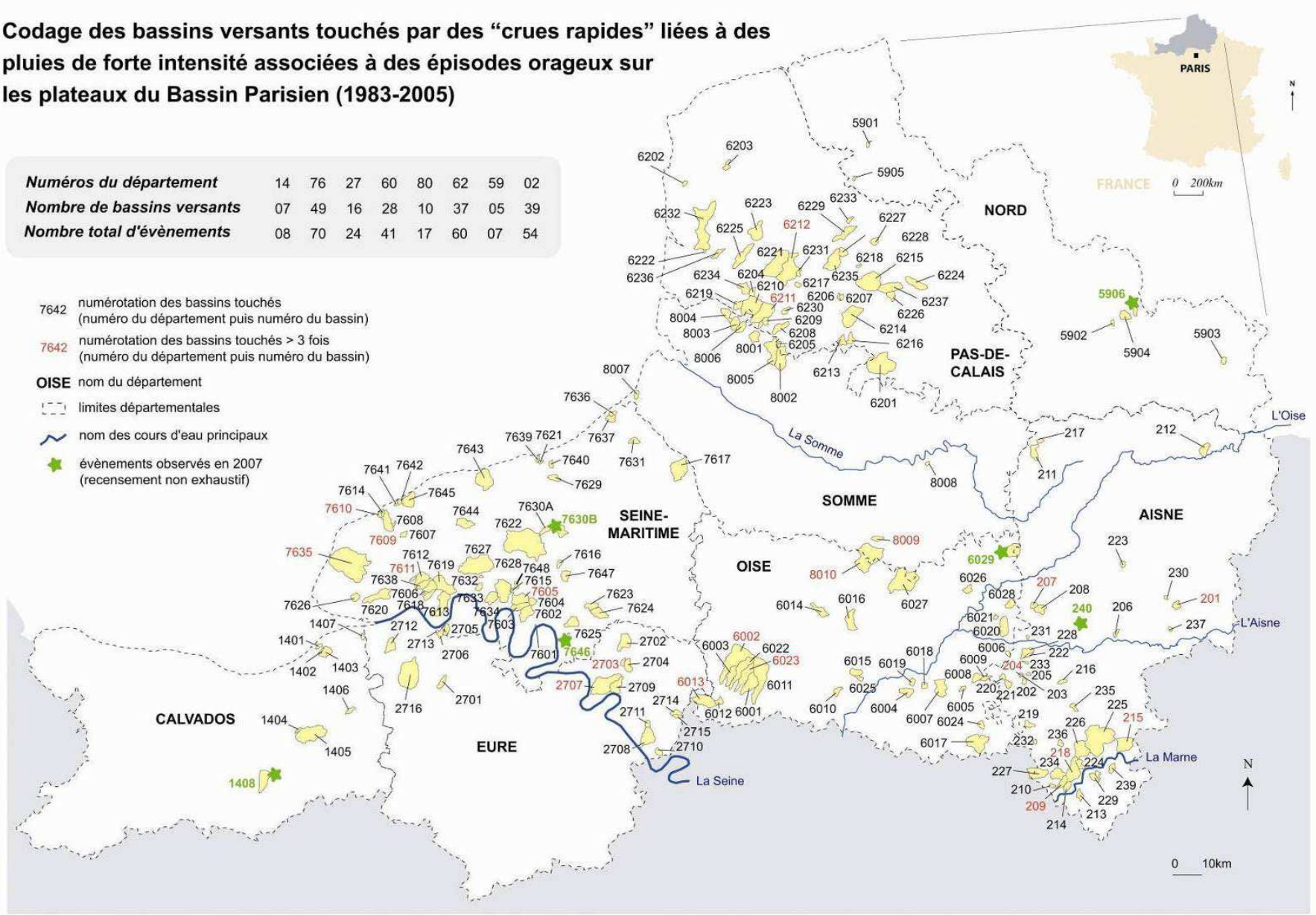
Les « *crues rapides* » sont nombreuses si on se replace à l'échelle de la zone d'étude. Afin d'éviter toute confusion, il est important de rappeler que les **épisodes** désignent les dates des « *crues rapides* » tandis que les **événements** identifient chacune des crues recensées, observées sur chacun des 189 bassins versants. En moyenne, ce sont 8,5 bassins et 11,5 événements qui sont recensés tous les ans (sur la période 1983-2005) sur les huit départements étudiés.

Si le risque semblait au départ épisodique et ponctuel, cet inventaire montre que ces crises hydrologiques sont fréquemment observées en se plaçant à une échelle régionale.

2.4.4. Structure et mise à jour de l'inventaire

Des phénomènes *« crues rapides »* peuvent être régulièrement ajoutés à la base de données. En effet, la nomenclature usitée pour organiser l'inventaire est compatible avec des mises à jour. Les premiers chiffres correspondent au numéro du département (59 pour le Nord, 14 pour le Calvados, 2 pour l'Aisne…) suivi d'un code qui liste les différents bassins (fig. 2.11.).

Fig. 2.11. Nomenclature choisie : numéro du département puis code du bassin versant.



Document réalisé par J.Douvinet d'après les SCAN 25 © IGN de la région Nord-Pas-de-Calais / Conseil Régional de Picardie ; Agences de l'Eau Seine-Normandie / Artois-Picardie.
Convention"recherche" Ministère Intérieur / DDSC / Archives Nationales / Centre des Archives Contemporaines pour l'accès aux données 'CatNat' (1983-2005)

Fig. 2.12. Numéros attribués pour chaque bassin versant recensé (1983-2005) + 2007.

La méthode de classification permet d'ajouter des bassins versants nouvellement touchés sans perturber la structure générale de l'inventaire. Le nombre de récurrences et les dates des événements sont aussi renseignés dans une table attributaire (fig. 2.12.). La base se limite à la période 1983-2005. A titre d'exemple, quelques événements observés pour l'année 2007 ont été ajoutés dans la base de données (fig. 2.11.). Deux bassins versants localisés dans le Pays de Caux avaient déjà subi une « *crue rapide* » durant la période 1983-2005. En revanche, des bassins sont touchés pour la première fois [Estreux (59), Vendeuvre (14), Guiscart et Tergny-Sorgny (60)]. Ces bassins se localisent à proximité de zones déjà identifiées comme touchées au cours de la période 1983-2005 (fig. 2.12.), ce qui conforte la pertinence de la carte réalisée.

Conclusions du chapitre 2

Les « *crues rapides* » ont fait l'objet d'une méthode d'inventaire spécifique et originale, qui se base sur les notions de **sinistralité** et **d'endommagement** des inondations, perçues comme dommageables et coûteuses pour la société (Pigeon, 2000). L'analyse des données « *CatNat* » ne doit pas se limiter à son interprétation statistique pour plusieurs raisons :

- l'item « *inondations et coulées de boue* » est trop généraliste ;
- le seuil de « *pluie décennale* » est arbitraire pour des pluies orageuses ;
- la prise de décision est avant tout politique et elle manque de critères scientifiques ;
- la procédure « *CatNat* » peut être remplacée par d'autres systèmes d'indemnisation ;
- la perception des maires par rapport à cette procédure a évolué depuis 1983.

Les limites imputables à la qualité des données, à l'architecture de la base « *CatNat* », et aux objectifs réglementaires inhérents à la procédure de reconnaissance, obligent à contrôler la fiabilité de la base de données. Grâce à une convention « *Recherche* » mise en place avec les Archives Nationales et la DDSC, les rapports techniques associés aux dossiers « *CatNat* » ont pu être analysés. Ces documents ont été, à cet égard, des supports d'analyse indispensables.

L'inventaire permet de souligner à quel point les « *crues rapides* » sont nombreuses à une échelle régionale. Plusieurs chiffres sont importants à rappeler :

- **8,5 bassins sont touchés en moyenne par an sur une surface de ~ 50 000 km²** ;
- **121 épisodes pluvieux (dates d'événement) sont conservés sur la période 1983-2005** ;
- **189 bassins versants sont reconnus comme « *touchés* » en 23 ans (1983-2005)** ;
- **des bassins ayant été touchés à plusieurs reprises, ce sont finalement 269 événements « *crues rapides* » qui sont observés dans ces régions du nord de la France ;**
- **302 communes ont réellement subi des dégâts associés à des « *crues rapides* »** ;

La répartition spatiale des bassins versants est intéressante car elle indique la sensibilité accrue de certains secteurs géographiques, notamment les collines de l'Artois, les secteurs à corniche du Soissonnais et le Pays de Caux. L'inventaire fournit désormais un **échantillon de 189 bassins versants** sur lesquels une approche comparative va pouvoir être menée. Dans le chapitre suivant, on propose d'analyser la distribution des 269 événements afin de connaître leur répartition spatiale et temporelle sur la période étudiée. Le traitement des informations associées aux dossiers « *CatNat* » devrait également permettre d'évaluer la vulnérabilité des espaces touchés et de comparer l'ampleur des sinistres estimés sur les 189 bassins touchés.

Chapitre 3

Le risque « *crues rapides* » dans les régions du nord de la France : contexte et état des lieux

Introduction	**p. 74**
3.1. Distribution spatio-temporelle des événements	**p. 74**
3.2. Ampleur des dégâts associés aux « *crues rapides* »	**p. 84**
3.3. Regards croisés sur le risque « *crues rapides* »	**p. 90**
Conclusions du chapitre 3	**p. 95**

Estreux (59) – Crue du 7 juin 2007
Cliché : I.Douvinet

Introduction

L'homme a une large part de responsabilité dans les conséquences directes et indirectes des inondations, dans la mesure où il a maintenu et développé des implantations et activités dans des secteurs « *à risque* » (Malet, 2003). Le risque « *crue rapide* » résulte de la combinaison d'un **aléa** (arrivée violente et brutale de ruissellements concentrés) et d'une **vulnérabilité** liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures…). Le coût des dégâts matériels et humains est fonction de l'intensité, de la soudaineté, de la durée du phénomène, mais aussi des enjeux (biens et personnes) exposés (Veyret-Meldjian, 2001).

Une double approche est proposée. Dans un premier temps, une **approche diachronique** est menée afin de mettre à jour les évolutions dans le temps et dans l'espace des catastrophes recensées. L'inventaire ayant été réalisé à partir des dossiers « *CatNat* », l'objet étudié n'est pas l'aléa, mais bel et bien la catastrophe. Le but recherché ici est de savoir si les événements « *catastrophiques* » sont des phénomènes ponctuels ou chroniques, et s'ils sont en constante augmentation. Dans un second temps, l'analyse des sinistres et leur estimation financière ont permis de comparer **l'ampleur** et la **gravité des dommages** subis sur les **189 bassins versants touchés.** Une échelle de comparaison est proposée en se basant sur des critères communs aux grilles d'évaluation des inondations réalisées par le Ministère de l'Environnement, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD, 2005). Cette évaluation a conduit à la réalisation d'une cartographie synthétique des dommages subis sur la période 1983-2005.

L'analyse des **occurrences** (§ 3.1.) et des **dommages** liés aux « *crues rapides* » (§ 3.2.) doit permettre une meilleure caractérisation du risque « *crues rapides* » dans les régions du nord de la France. La gestion d'un risque progresse souvent après l'apparition d'une crise (Veyret, et Garry, 1998 ; Meschinet de Richemont, 2003). Une discussion (§ 3.3.) peut finalement être engagée sur la vulnérabilité des espaces touchés et sur la perception du risque à travers deux points de vue différents, l'un de la presse, l'autre émanant de plusieurs études scientifiques. Ces résultats affinent le contexte de recherche dans lequel s'inscrit ce travail de thèse.

3.1. Distributions spatio-temporelles des événements

Il convient de rappeler la définition des termes utilisés dans cette section : un **événement** (269) identifie un phénomène « *crue rapide* » ; un **épisode** désigne la date de recensement de cet événement ; le **nombre de bassins touchés** (189) correspond aux entités spatialisées.

3.1.1. Evolution dans le temps (1983-2005)

L'étude diachronique se focalise, en premier lieu, sur la distribution dans le temps des **269 événements recensés** (1983-2005). Plusieurs travaux (Merle *et al*, 2001 ; Le Bissonnais *et al*., 2002 ; MEDD, 2003) ont démontré une progression massive des phénomènes en périodes printanière et estivale depuis le début des années 1990. Entre 1947 et 2001, 8 crues sur 11 sont dues à un orage sur le bassin de Sannerville (21 km²) situé dans le Mantois (Meyer, 2001). En Seine-Maritime, les épisodes orageux sont à l'origine de 68 % des crues recensées entre 1960 et 2000 (Delahaye, 2002). L'objectif ici est de savoir si des tendances similaires sont observées avec notre échantillon, même si la période de temps et les données ne sont pas les mêmes. L'étude portera ici sur le nombre d'événements et non sur les communes touchées.

Le nombre d'épisodes et d'événements a été comptabilisé par département et par année entre 1983 et 2005 (tab. 3.1), montrant une **progression flagrante depuis le début des années 1990** avec quatre périodes. La période 1983-1991 est relativement calme : 34 événements (soit 12 %) y sont recensés. **Une première phase d'augmentation débute en 1992, suivie d'une plus forte recrudescence du nombre de bassins touchés à partir de 1996.** Les épisodes du 16 juin 1997, du 6 juin 1998, du 3 juin 2000 et du 6-7 juillet 2001 ont été les plus dommageables. Plus de 10 bassins ont subi des dégâts pour chaque épisode et **55 % des « *crues rapides* » ont été recensées en 5 ans (1997-2001).** La période 2002-2005 est plus calme, avec 1 seul épisode recensé pour l'année 2004. Ce constat ne signifie pas la fin du cycle puisque de nouveau, en 2007, on recense une nouvelle phase de recrudescence avec 13 événements ayant donné lieu à des évènements déclarés (7 juin (4 bassins), 20 juin (3), 27 juin (2), 16 juillet (2), 8 août (2)).

Année	Calvados	Seine-M.	Eure	Somme	Oise	Pas-de-C.	Nord	Aisne	Nb. Épis.	Nb. Bas.	Moy.	
1983	0	2	2	2	2	0	0	0	3	8	2,6	Période calme : peu de bassins recensés
1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1985	0	1	2	0	1	0	0	0	3	4	1,3	
1986	0	0	0	0	2	0	0	3	4	5	1,25	
1987	0	1	0	0	0	1	0	0	2	2	1	
1988	0	2	1	0	3	0	0	1	4	7	1,75	
1989	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1990	0	0	0	0	1	0	0	1	2	2	1	
1991	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	
1992	0	3	0	0	1	2	2	3	7	11	1,4	Première phase d'augmentation
1993	0	8	0	0	4	0	0	5	3	17	5,6	
1994	0	2	1	4	3	12	1	3	8	26	3,25	
1995	0	3	0	1	1	0	0	2	3	7	2,3	
1996	0	0	0	0	0	1	1	4	1	6	6	
1997	3	11	9	1	15	0	0	2	8	41	5,4	Seconde phase d'augmentation plus marquée
1998	0	13	3	2	0	9	0	0	2	27	13,5	
1999	0	0	3	0	0	0	2	1	3	6	2	
2000	0	10	1	2	5	10	1	18	11	47	4,3	
2001	2	6	0	4	2	9	0	5	7	28	4	
2002	0	0	0	1	0	5	0	0	2	5	2,5	Période plus calme : peu de bassins
2003	3	3	0	0	0	0	0	1	4	7	1,75	
2004	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
2005	0	3	0	0	0	7	0	0	2	10	5	
total	**8**	**69**	**22**	**17**	**41**	**56**	**7**	**49**	**79**	**269**	**3,36**	

Département le plus à l'ouest ← → *Département le plus à l'est*

Tab. 3.1. Nombre d'événements (269) classés par année et par département (1983-2005).

Le nombre d'événements par épisode est très élevé entre 1992 et 2001 même si le nombre d'épisodes ne s'accroît pas de manière significative. 1997 et 2000 sont les deux années où on recense le plus grand nombre de « *crues rapides* » (41 et 47 bassins). L'extension spatiale est marquée pour plusieurs années (1996, 1997, 1998, 2000 et 2005). Ce constat peut s'expliquer soit par une extension spatiale plus prononcée des épisodes pluvieux de forte intensité, soit par des précipitations violentes plus nombreuses au cours de la période 1992-2001, ou bien par une plus forte vulnérabilité des populations face à l'aléa. Cette hypothèse semble, en partie, remise en cause puisque depuis 2001, les événements ont été moins violents (fig. 3.1.).

Des différences importantes s'observent entre les départements (fig. 3.2.). Avant le début des années 1990, le Calvados, le Nord, le Pas-de-Calais et la Somme sont très peu concernés. Aucune « *crue rapide* » n'a été observée avant 1997 dans le Calvados. Sur la période 2002-2005, aucun événement n'a d'ailleurs été recensé sur l'Eure, l'Oise et le Nord. Sur ce dernier, un ou deux épisodes sont par contre annuellement observés entre 1992 et 2000 (tab. 3.1.).

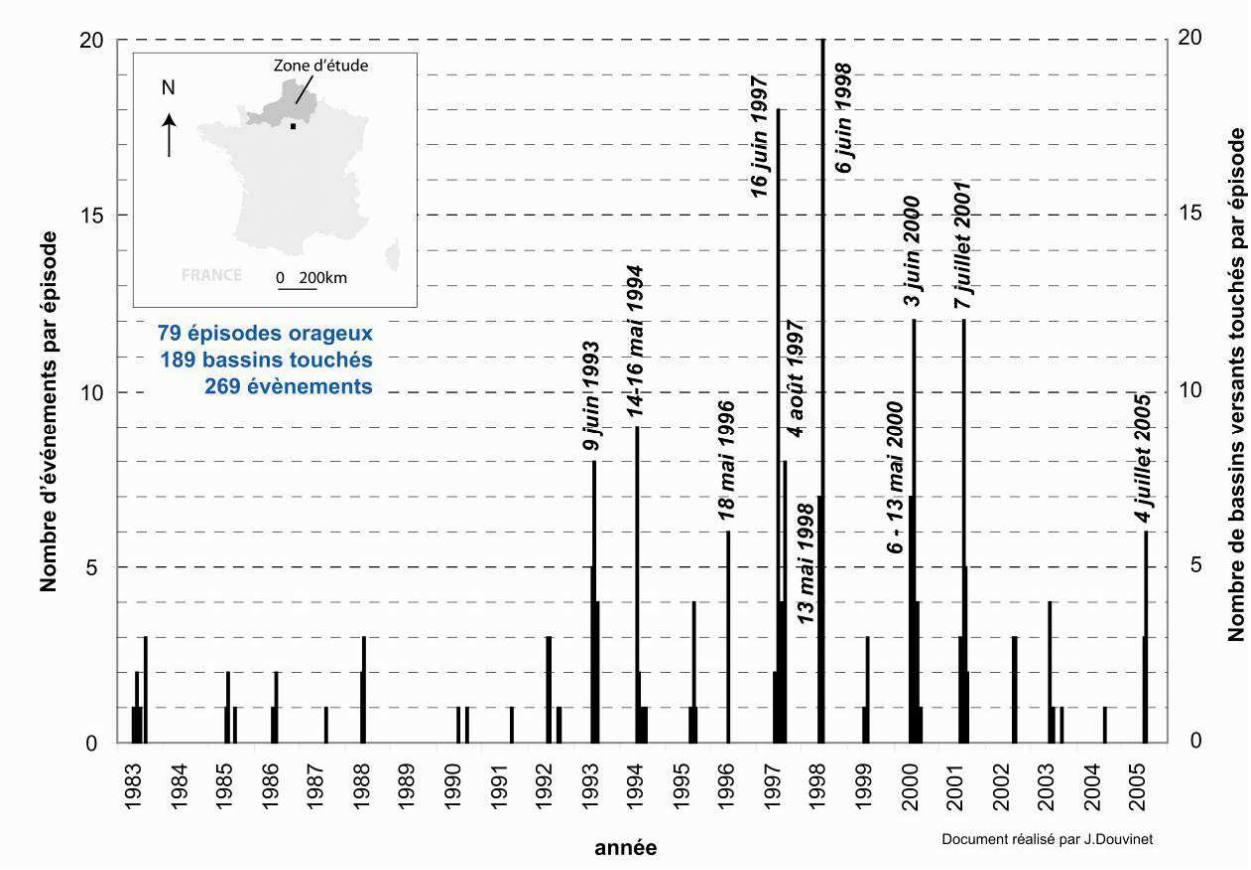


Fig. 3.1. Evolution du nombre d'événements par épisode.

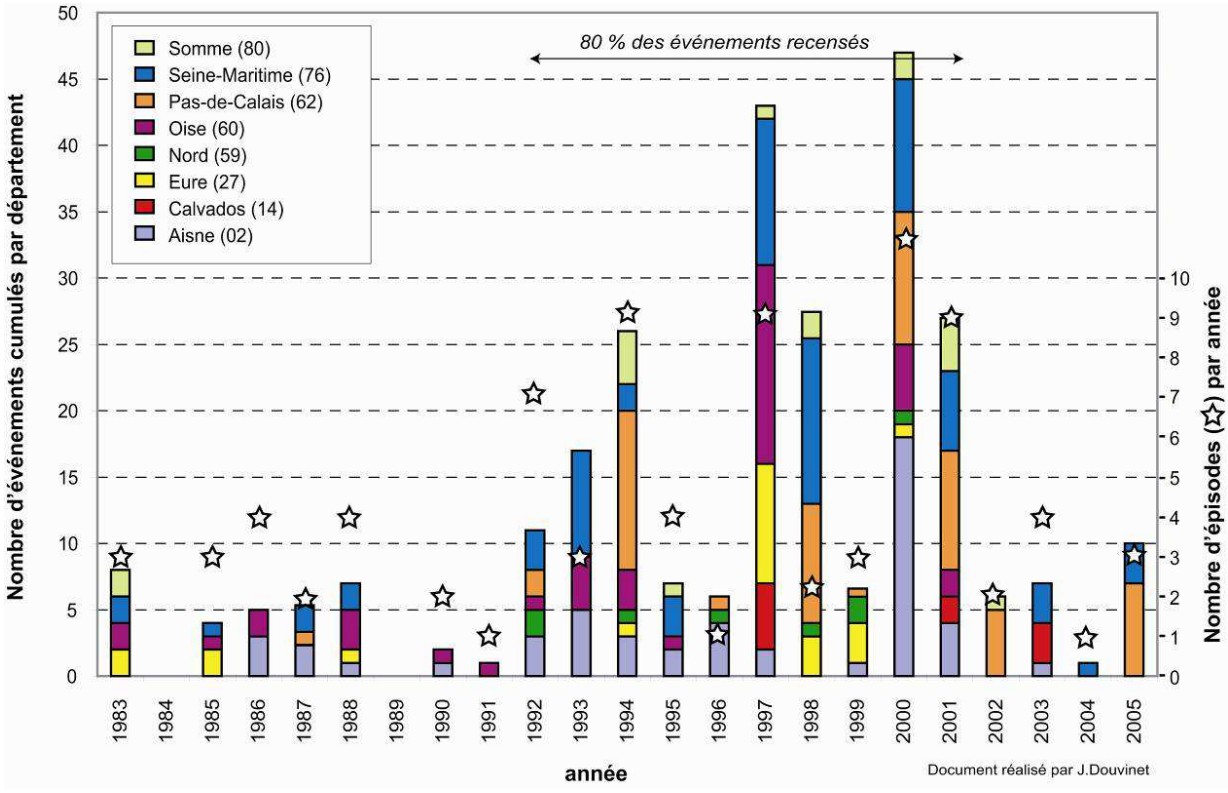


Fig. 3.2. Nombre d'événements cumulés par année et par département.

Les autres départements présentent une sensibilité marquée aux « *crues rapides* ». L'Oise et l'Aisne sont fortement touchées sur la période 1983-1990. L'Aisne est régulièrement sujette aux crues entre 1992 et 1996. A partir de 1992, la Seine Maritime (8 bassins inondés le 9 juin 1993) et le Pas-de-Calais (7 bassins inondés le 24 juillet 1994) recensent de nombreuses crues. Sur les autres départements, les événements peuvent ponctuellement prendre une ampleur importante : l'Oise en 1997 (15 bassins) ; l'Aisne en 2000 (18 bassins).

La Seine-Maritime apparaît comme la zone la plus affectée (68 bassins). Les événements sont également répétés sur une courte période. **42 bassins sont touchés entre 1997 et 2001**, ce qui représente 64 % des bassins recensés sur la période 1983-2005. L'Aisne connaît également une succession d'événements rapprochés dans le temps au cours de la période 1992-1997, et 60 % des bassins touchés dans le Pas-de-Calais ont été recensés sur la période 1998-2002.

Cette étude montre finalement que les événements sont annuellement observés, avec une moyenne de six bassins versants touchés tous les ans depuis 1992.

3.1.2. Récurrence des événements par bassin versant

Le nombre de « *crue rapide* » a été recensé sur chaque bassin (tab. 3.2.) : 128 bassins ont été touchés une seule fois (soit 67,7 %), 39 bassins 2 fois (20,6 %), 17 bassins 3 fois (8,9 %), et 3 bassins 4 fois (1,6 %). **La majorité des bassins (68 %) a été touchée par un seul événement en 23 ans** (fig. 3.3.), ce qui confirme la faible récurrence des crues aux mêmes endroits.

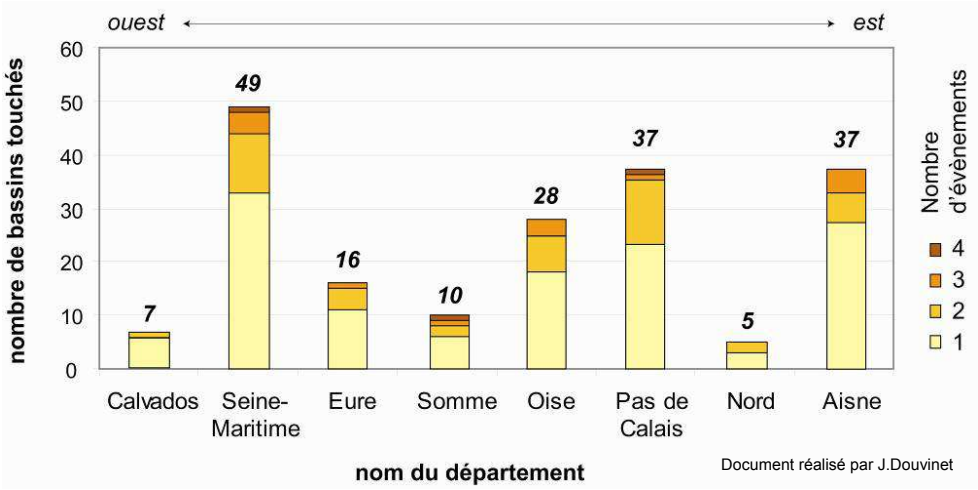


Fig. 3.3. Nombre de récurrences par bassins pour plusieurs départements.

Les bassins versants ne sont pas tous des « *vallons secs* », contrairement à nos premières observations. **Des événements se sont produits sur 34 bassins où un réseau pérenne circule en temps normal, ce qui représente 18 % de l'échantillon.** Ces bassins, de taille variée, se localisent principalement sur les collines de l'Artois, dans le Soissonnais et le Vexin, là où les raccordements avec les niveaux de base sont aptes à maintenir des écoulements permanents.

Les bassins les plus fréquemment touchés [Auchy les Hesdin (62), l'amont de la Lézarde (76), le bassin de la Fontaine (76)] sont drainés par des cours d'eau pérennes (fig. 2.13). Leur **sensibilité plus élevée** peut s'expliquer par leur plus grande taille, qui sous entend une plus

grande vulnérabilité. La présence d'un cours d'eau permanent suggère aussi une capacité à évacuer les écoulements boueux de manière plus rapide, et en corollaire, une propension à engendrer des dégâts plus importants. Les « *crues rapides* » qui sont apparues une seule fois sur des vallons secs, d'ordre 1 à 3, semblent néanmoins les plus dramatiques (crues du 9 juin 1993 ; 16 juin 1997 ; 9 mai 2000).

Numéros des départements	**14**	**76**	**27**	**80**	**60**	**62**	**59**	**02**	**total**
Nombre de bassins touchés UNE fois	6	35	12	6	18	22	3	26	128
Nombre de bassins touchés DEUX fois	1	9	2	2	7	12	2	4	39
Nombre de bassins touchés TROIS fois	-	4	2	1	3	2	-	5	17
Nombre de bassins touchés QUATRE fois	-	1	-	1	-	1	-	-	3
Nombre de bassins versants touchés par département	7	49	16	10	28	37	5	37	189
Nombre total d'événements recensés par département	8	69	22	17	41	56	7	49	269

Tab. 3.2. Récurrence des événements sur les 189 bassins touchés (1983-2005).

Il convient de préciser que des **événements apparaissant sur un même bassin** peuvent présenter une très grande **hétérogénéité**. Pour illustrer ce propos, on peut citer l'exemple du bassin de la Kilienne (62) (Douvinet et Delahaye, 2007). Lors de la crue du 31 mai 1992, c'est la partie la plus en aval qui a fonctionné. Les dommages ont été importants à l'exutoire d'un petit vallon, couvert par des cultures de betteraves et de pois qui ont rapidement ruisselées. En revanche, en juin 1998, c'est la totalité du bassin qui a fonctionné. **La récurrence des crues est donc à bien dissocier de l'ampleur des sinistres** (§ 3.2.).

3.1.3. Répartition des « *crues rapides* » par décades

Une autre étude a été menée pour voir si des **périodes** privilégiées d'apparition des crues **existent aux échelles mensuelle et intra-mensuelle**. Sur la période d'étude considérée (entre mai et août inclus), **le mois de juin ressort comme la période de prédilection la plus forte** (37 % des événements recensés), suivi de mai (30 %), juillet (19 %) et août (14 %).

A une échelle intra mensuelle, l**a deuxième décade de mai et la première de juin** sont les plus favorables à l'apparition des « *crues rapides* ». **Elles regroupent 38 % des événements recensés (fig. 3.4.). Les catastrophes se répartissent de manière plus uniforme au cours des autres décades**, même si un regain d'activité s'observe au début des mois de juillet et août.

Des différences importantes s'observent entre les départements. L'Aisne (17 événements entre le 10 et le 20 mai) et la Seine-Maritime sont fortement touchées au cours des premières décades de mai. Tous les départements subissent des crues au cours de la première décade de juin. La partie occidentale de la zone d'étude (Calvados, Eure, Seine-Maritime, Oise) est touchée jusqu'au 20 juin. Au mois de juillet, les bassins sont plus nombreux dans le Pas-de-Calais et l'Aisne. **Les autres événements restent dispersés de manière plus aléatoire dans le temps** (tab. 3.3.).

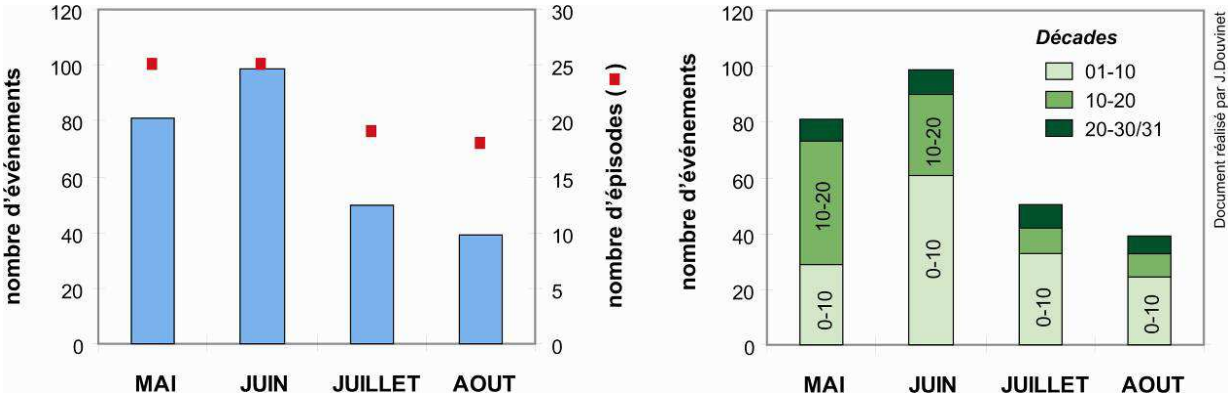


Fig. 3.4. Distribution mensuelle (**a**) et par décades (**b**) des événements.

nom du département	MAI			JUIN			JUILLET			AOÛT			total
	01-10	10-20	20-31	01-10	10-20	20-30	01-10	10-20	20-31	01-10	10-20	20-31	
CALVADOS				3	4						1		8
SEINE-MARITIME	13	7		20	12	4	2	1	1	7	2		69
EURE	1		2	7	5			2	3	1	1		22
SOMME		4		5	2	1	2		2	1	1		17
OISE	2	8	2	4	5		6	3		9		2	41
PAS-DE-CALAIS	3	11		15	1	1	14	2		2	2	5	56
NORD	1	1	2	2							1		7
AISNE	7	17		4	3	1	9		3	3		2	49
total par décade	27	48	6	60	32	7	33	8	9	22	8	9	269
total par mois	81			99			50			39			269

Document réalisé par J.Douvinet

Tab. 3.3. Répartition des événements « *crues rapides* » par décade et par département.

En corollaire à cette étude menée sur la répartition des événements par décades, il semble nécessaire de vérifier si des tendances se dégagent spatialement suivant les mois considérés.

3.1.4. Distribution spatiale et temporalités

On émet l'hypothèse qu'un gradient spatial guiderait la répartition, dans le temps, des catastrophes recensées. Pour vérifier cette supposition, les événements ont été cartographiés suivant leur mois d'apparition (fig. 3.9.). Les cartes complètent les analyses statistiques en identifiant les secteurs les plus fréquemment touchés durant le mois de **mai** (fig. 3.5.), **juin** (fig. 3.6.), **juillet** (fig. 3.7.) et **août** (fig. 3.8.). **Les résultats semblent confirmer une certaine « *saisonnalité* » à l'échelle de la zone étudiée et sur la période mai-août inclus.**

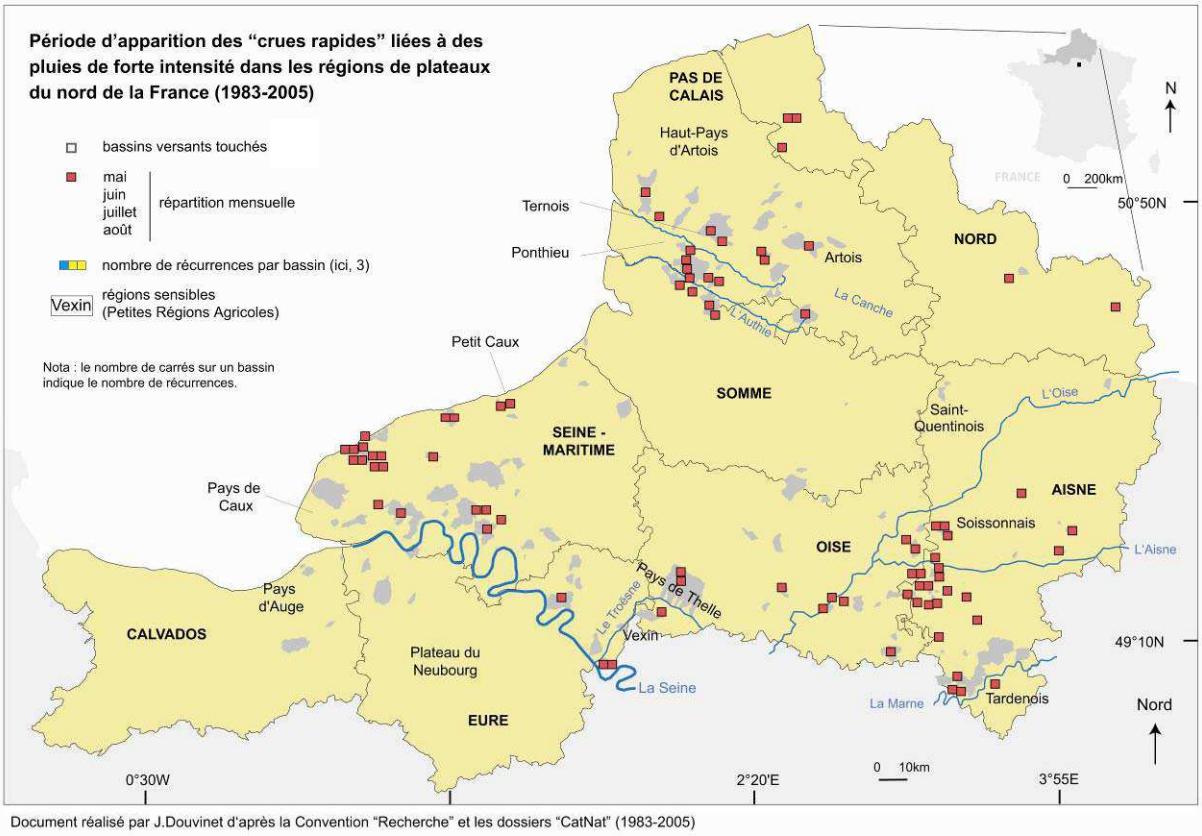


Fig. 3.5. Répartition des 81 événements recensés au cours du mois de **mai**.

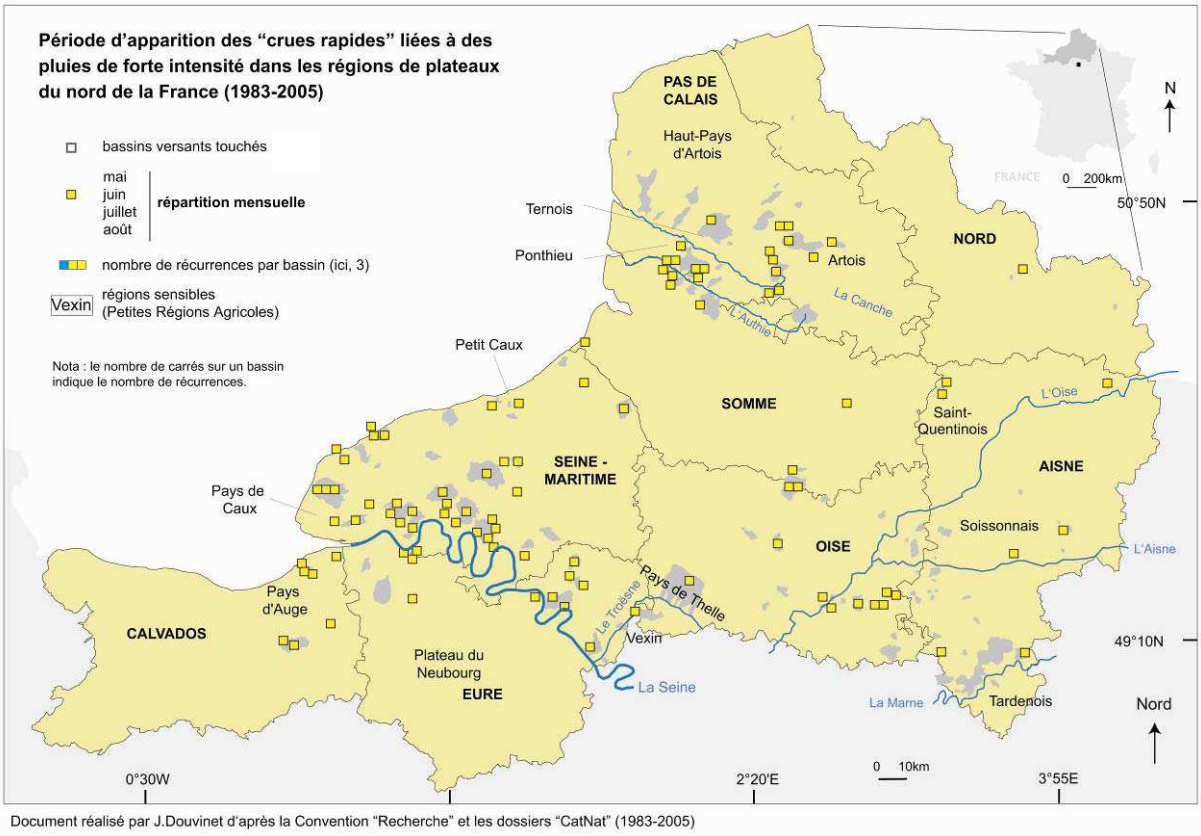


Fig. 3.6. Répartition des 99 événements recensés au cours du mois de **juin**.

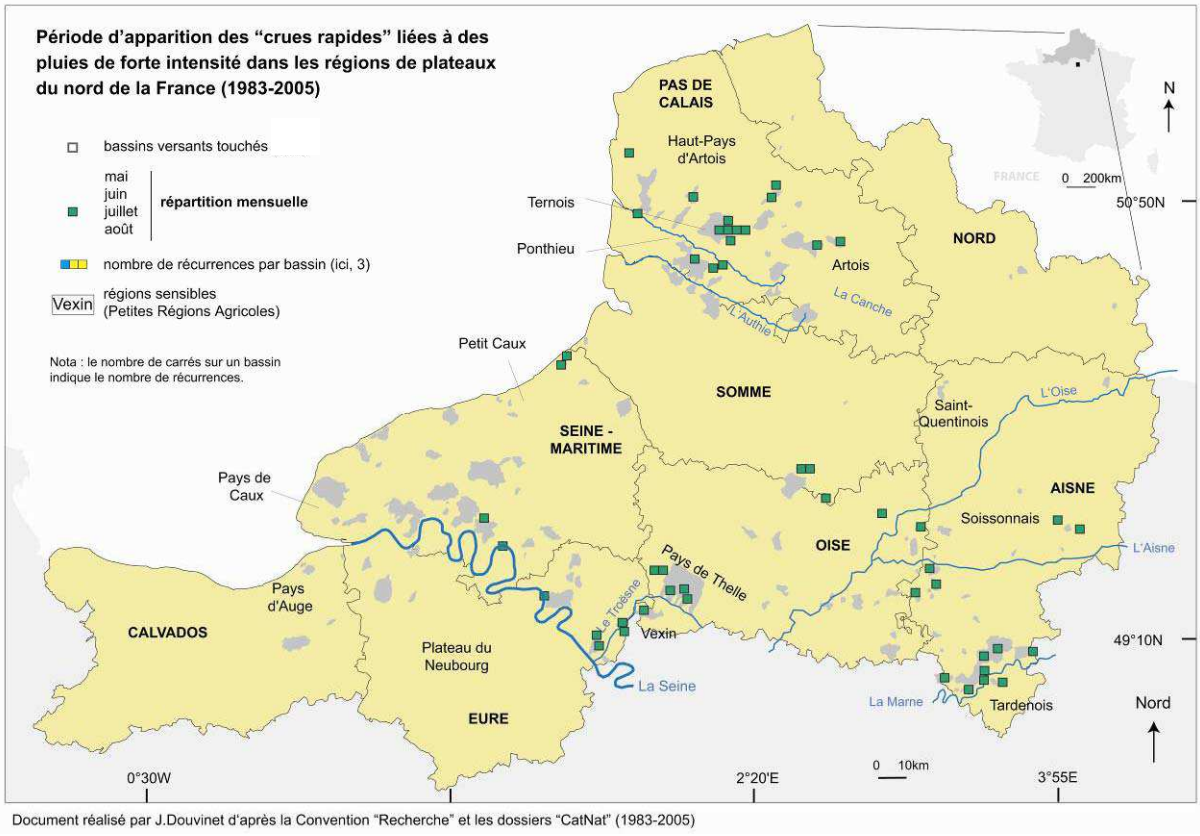


Fig. 3.7. Répartition des 50 événements recensés au cours du mois de **juillet**.

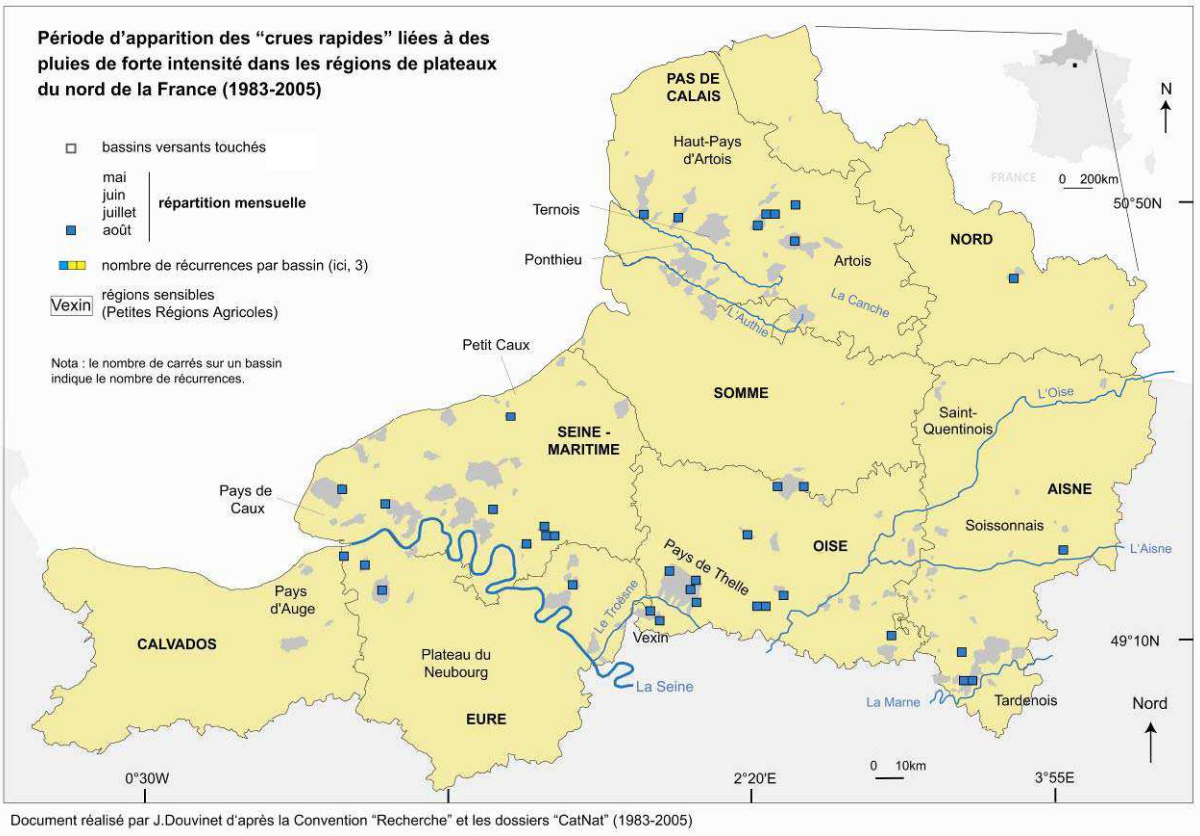


Fig. 3.8. Répartition des 39 événements recensés au cours du mois d'**août**.

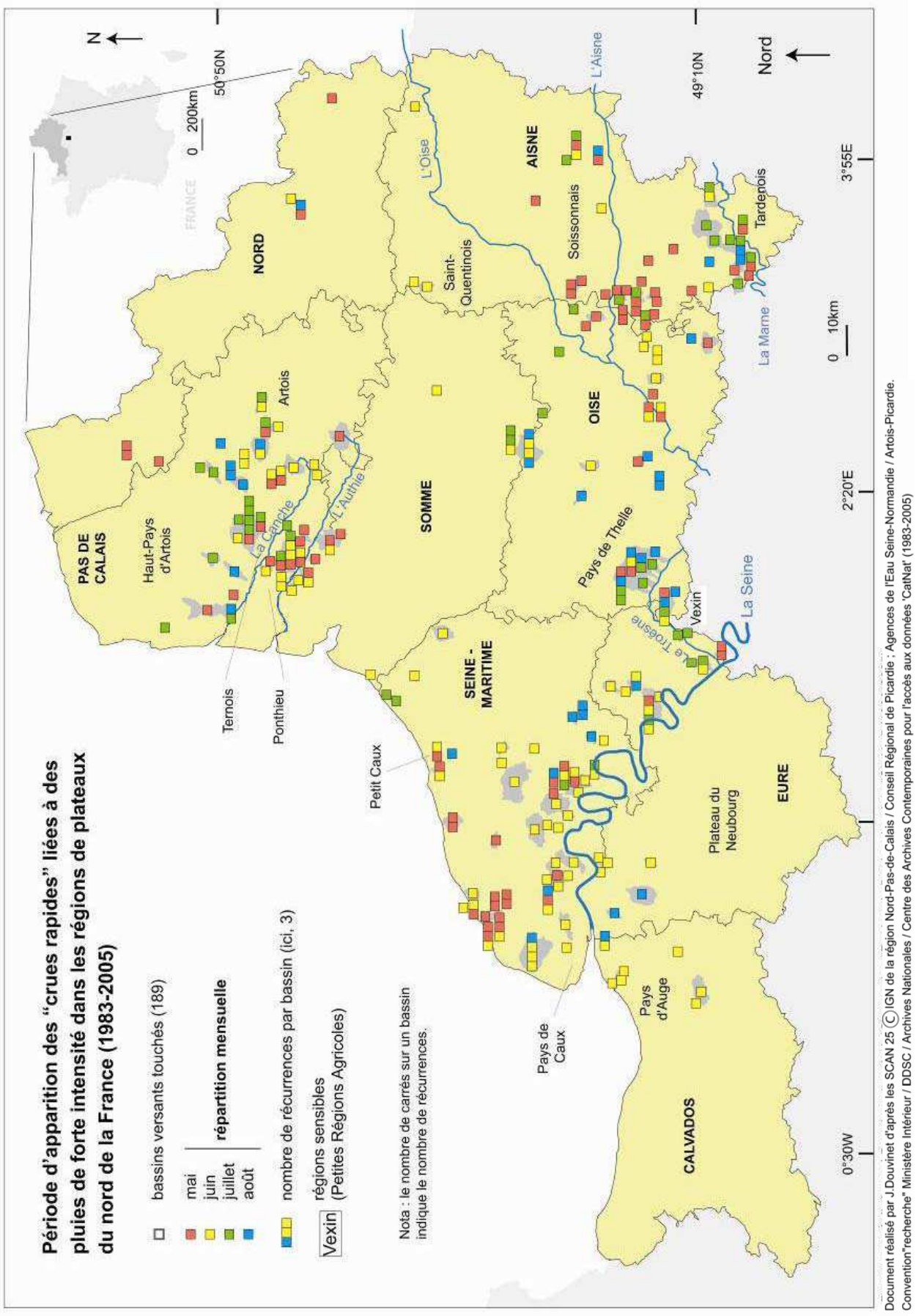


Fig. 3.9. Répartition mensuelle des 269 événements (1983-2005).

Différentes temporalités apparaissent ainsi au cours de la période étudiée :

- en **mai** : les événements se concentrent dans la région de Fécamp, à l'ouest de Rouen, dans le Tardenois, le long des vallées de l'Authie, de la Marne et de l'Oise. La sensibilité de l'Aisne est assez surprenante. Les événements ont eu lieu en mai 1983, 1996 et 2000. A l'ouest de Fécamp, les bassins ont été recensés le 13 mai 1998 et du 8 au 10 mai 2000 ;

- en **juin** : l'ensemble de la zone d'étude est effectivement touchée et de manière aléatoire. Les crues semblent toutefois plus nombreuses dans la partie occidentale (fig. 3.6.), dans le Calvados, l'Eure, et la Seine-Maritime. Le Pas-de-Calais est également touché ;

- en **juillet** : les crues déclarées se localisent le long de la Troësne, de la Seine et de la Marne. Les événements sont nombreux sur les collines de l'Artois (62). L'alignement de certains bassins (axe SW/NE) est lié au passage de la ligne de grains du 4 juillet 2005 ;

- en **août** : les événements apparaissent extrêmement dispersés sur l'ensemble de la zone d'étude, prioritairement dans la vallée de la Seine et sur les collines de l'Artois (fig. 3.8.).

La carte souligne les particularités de certains secteurs géographiques. Le Pays de Caux, la vallée de la Seine et les collines de l'Artois sont régulièrement touchés sur la période mai-août inclus. Dans la vallée de la Troësne, les crues sont principalement observées en juillet et août. Dans la partie occidentale de l'Aisne, les événements apparaissent en mai et en juillet. Certaines crues peuvent apparaître sur les mêmes bassins tout au long de la période étudiée : juin, juillet, août et mai pour le ru d'Hérouval (6013) ; mai, juin et août sur le Ru Caillouet (6023) ; juin, mai et août pour le bassin de la Fernague (7611).

Ces résultats amènent à poser deux questions auxquelles on répondra plus tard : la part des terres cultivées, peu couvrantes au mois de mai, pourrait-elle expliquer le déclenchement des « *crues rapides* » au cours de cette période ? La variabilité de l'aléa climatique se cache-t-elle derrière cette variabilité spatiale ? Porter une analyse plus fine, en l'absence de cartes des occurrences des orages, est en tous cas délicat à ce stade.

Cet inventaire permet finalement de mieux évaluer la distribution des événements dans le temps et dans l'espace. A une échelle infra mensuelle, la deuxième décade de mai et la première décade de juin sont les deux périodes les plus propices à l'apparition de « *crues rapides* » dans ces régions. La « *saisonnalité* » observée sur certains secteurs géographiques est à vérifier par une étude climatologique plus fine.

3.2. Ampleur des dégâts associés aux « *crues rapides* »

L'accès aux dossiers « *CatNat* » permet conjointement de mesurer **l'ampleur** et la **gravité des dégâts subis** sur les 189 bassins versants. L'analyse des dommages matériels et humains amène à s'interroger sur la **vulnérabilité** des espaces touchés. On entend ici par vulnérabilité l'endommagement des biens et des personnes et leurs répercussions sur l'environnement.

On retient ainsi la définition classique (vulnérabilité dite « *analytique* ») au sens défini par R. D'Ercole (1994). D'autres méthodes proposent de considérer la vulnérabilité de manière plus « *synthétique* » (approches qualitatives, quantitatives, semi quantitatives), soit la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité de réponse à une crise potentielle. Il faut pour cela mettre en place un protocole d'étude adaptée à échelle fine, ce qui n'est pas le cas ici car on se limite à l'analyse des informations associées aux dossiers « *CatNat* ».

3.2.1. Coût des dommages matériels

L'évaluation financière des dégâts participe à une meilleure caractérisation du risque. Il existe différentes sources d'informations pour quantifier les pertes économiques : dossiers de déclarations auprès des assurances ; fonds de garantie des calamités agricoles …

La quantification monétaire des dommages reste discutable pour plusieurs raisons :

- les effets indirects des inondations (impacts sur l'environnement, pollutions des points de captage des eaux, impacts psychologiques de la crue) sont difficiles à apprécier ;

- les évaluations financières sont soumises à de larges incertitudes (IGE, 2001) ;

- si la Caisse Centrale de Réassurances (CCR) fournit des statistiques assez précises par département, en chiffrant les coûts des dommages liés aux inondations, les événements hydrologiques ne sont pas dissociés entre eux (Delahaye, 2002).

En dépit de la systématisation des méthodes de recueil des données, l'établissement des « *comptes* » des inondations n'est donc pas aisé. Le coût des dégâts liés aux « *crues rapides* » a été possible grâce aux informations récupérées dans les dossiers « *CatNat* » (cf. chapitre 2). Si les chiffres mentionnés ne représentent que l'**estimation basse du coût total des sinistres**, ils donnent cependant une idée de l'ampleur des coûts des dommages liés à ces « *crues rapides* » qui touchent des bassins de petite taille. 22 épisodes (les plus coûteux) ont été chiffrés pour chaque département ; ils représentent 1/5 des épisodes recensés.

Les estimations varient entre 500k € et 16M € selon les épisodes et la taille des bassins. Les communes, aux budgets limités, n'ont pas à supporter la totalité des dommages grâce à la procédure de reconnaissance « *CatNat* ». Certains épisodes ont une ampleur considérable :
- 14 M € pour la crue du 16 juin 1997 qui a touché une surface < 30 km² ;
- plus de 8M € pour la région de Fécamp (~ 15 km²) lors des crues du 13 mai 1998 ;
- 5,3 M € pour la crue du 1er juin 2003 pour deux bassins d'une surface < 10 km² ;
- 5 M € pour les inondations liées aux orages et à la grêle du 23 juillet 1994 (< 10 km²).

Les épisodes les plus coûteux relevés sur la période d'étude (tab. 3.4) sont tous recensés en Seine-Maritime. Les coûts des dommages associés aux 9 événements dépassent les 50 M €. Ces chiffres sont très élevés par rapport aux autres départements.

Le coût des dégâts suit une **graduation amont – aval** au sein des bassins (Souchère, 1995 ; Le Bissonnais et Gascuel-Odeoux, 1998 ; Delahaye, 2002). Les dommages affectant les terres cultivées situées sur les plateaux sont les moins onéreux. Les agriculteurs sont les principaux concernés. La sédimentation peut ainsi provoquer le recouvrement des semis et le départ des produits phytosanitaires que l'on va retrouver en bas de parcelles ou dans les fourrières.

A partir du moment où les ruissellements concentrés sont suffisamment compétents, les dommages sont rapidement importants. **On passe du ruissellement diffus à la formation de rigoles sur de courtes distances** (tab. 3.5). Les dégâts les plus coûteux (routes coupées, ponts détruits, voitures emportées…) sont ceux subis par les populations qui sont implantées aux exutoires des petits bassins versants (cf. chapitre 1).

L'ampleur des dégâts dépend finalement de la **localisation** des **surfaces urbanisées** et de **l'importance des enjeux**, **d'où une variabilité importante entre les bassins.** Malgré la petite taille des bassins concernés, les dégâts peuvent atteindre des sommes considérables.

Aisne (02)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
11 juillet 1984	n.e. *	450 000	115 000	300 000	n.e.	750 000
1er septembre 1987	n.e.	n.e.	450 000	50 000	470 000	975 000
11 juin 1997	15 000	300 000	120 000	91 000	105 000	560 000
9 juillet 2000	n.e.	1 700 000	15 000	110 000	n.e.	2 580 000

Calvados (14)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
1er juin 2003 **	n.e.	3 400 000	400 000	n.e.	n.e.	5 300 000

Eure (27)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
12 août 1997	n.e.	380 000	n.e.	75 000	45 000	347 000
26 juillet 2001	n.e.	n.e	n.e	n.e.	n.e.	430 000

Nord (59)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
5 juin 1985	n.e.	330 000	160 000	n.e.	75 000	520 000
24 juillet 1993 ***	n.e.	330 000	160 000	n.e.	15 000	5 000 000

Oise (60)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
5 août 1997	315 000	455 000	180 000	80 000	60 000	1 750 000

Pas de Calais (62)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
21 mai 1992	200 000	55 000	9 000	n.e.	18 000	520 000
26 août 2002	n.e.	1 500 000	n.e.	n.e.	n.e.	2 475 000
3 / 4 juillet 2005	n.e.	250 000	n.e.	n.e.	n.e.	370 000

Seine -Maritime (76)

Date de la crue	voirie	particuliers	infrast. publiques	artisans	agriculteurs	coût estimé (€)
5 / 6 juin 1983	n.e.	4 000 000	3 000 000	300 000	n.e.	7 300 000
21 juin 1986	n.e.	150 000	22 000	230 000	n.e.	450 000
1er septembre 1987	150 000	2 300 000	n.e.	n.e.	n.e.	4 500 000
9 juin 1992	205 000	290 000	146 000	160 000	35 000	840000
9 juin 1993 ***	320 000	2 520 000	980 000	945 000	420 000	7 310 000
6 août 1995	325 000	1 270 000	300 000	10000	150 000	2 055 000
16 juin 1997	6 100 000	305 000	3 800 000	2 000 000	2 750 000	14 000 000
13 mai 1998 *****	1 800 000	600 000	2 200 000	200 000	95 000	5 900 000
6 juin 1998	580 000	3 595 000	280 000	1 540 000	1 250 000	9 015 000

* n.e. : estimations financières non données / infras. = infrastructures. Document réalisé par J.Douvinet
** : dont 4M € pour la seule commune deTrouville (Bernard, 2005).
*** : le coût total est de 22M€ dont 3/4 des dommages subis par les agriculteurs sont directement liés à la grêle.
**** : d'après les estimations du rapport de la DDE pour l'agglomération de Fécamp (DDE, 1999).

Tab. 3.4. Estimations financières des dégâts matériels pour les événements les plus coûteux dans chaque département (d'après les dossiers « *CatNat* »).

3.2.2. Drames humains liés à la mobilité des personnes en temps de crise

Les « *crues rapides* » sont parfois dramatiques à cause de la mobilité des personnes ou de leur réaction inappropriée au moment de l'apparition de la crue (Montz et Grundfest, 2002 ; Ruin *et al*., 2007). La montée rapide des niveaux d'eau peut surprendre les populations en déplacement et les crues rapides sont dangereuses car elles frappent des cibles difficiles à protéger. A ce titre, les crues recensées dans les régions du nord de la France présentent le même danger que les « *crues rapides* » observées dans le sud de la France, et plus largement dans le monde. Il convient de rappeler que dans la région du Languedoc-Roussillon, 40% des personnes ayant péri lors des crues rapides apparues au cours de la moitie du XX^{ème} siècle, ont été surpris par les eaux dans leur véhicule (Antoine *et al*., 2001). Aux Etats-Unis, des études ont montré qu'entre un tiers et la moitié des décès liés à des « *crues rapides* » sont associés à l'utilisation d'un véhicule motorisé en période de crue (Drobot *et al*., 2007).

Sur l'ensemble des événements recensés, on déplore 11 décès, dont 8 sont directement liés à la mobilité des personnes au moment de la crue, soit 73 % (tab. 3.4). Le **maintien des déplacements quotidiens**, comme par exemple les trajets domicile – travail, domicile – école, domicile – crèche, ou des **comportements imprudents**, comme traverser la crue sans prendre conscience de la force des écoulements, constituent une source de danger majeure déjà mise en évidence dans les travaux de Ruin et Lutoff (2004). Les réseaux routiers construits dans les fonds de vallons sont aussi un facteur de risque important.

Date de l'épisode à l'origine de la crue rapide	Nombre de décès	Type de décès			Ville où ont été recensées des pertes en vie humaine (numéro de département)
		Emportés dans leur véhicule	Mobiles ou en déplacement	Indirects	
6 juin 1983	2	1	0	1	St Pierre du Port, Sassetot (76)
21 juin 1986	1	0	1	0	St Martin de B. et Barentin (76)
16 juin 1997	4	4	0	0	La Havre (76)
9-10 mai 2000	2	1	1	0	Barentin, St Léonard (76)
9 juillet 2000	1	0	0	1	Coincy l'Abbaye (02)
1er juin 2003	1	0	0	1	Trouville (14)

Document réalisé par J.Douvinet

Tab. 3.5. Dégâts humains recensés lors des « *crues rapides* » survenues dans le nord de la France.

I. Ruin et C. Lutoff (2004) ont dégagé **trois profils à risque face aux crues torrentielles méditerranéennes**. Deux types semblent transposables dans les régions du nord de la France.

1 - Les comportements à « *risque* » sont ceux de personnes récemment installées dans la région et qui ont une faible perception des risques. Ils se traduisent par la mise en œuvre d'actions curatives risquées, avec des réactions « *au coup par coup* ». La très faible conscience du danger les amène par exemple à traverser plusieurs zones inondées dangereuses. « *Si au moment du départ, les conditions extérieures locales n'empêchent pas le déplacement, et si aucune information crédible, précise et ciblée, n'interdit pas celui-ci, le trajet est entrepris* » (Ruin et Lutoff, 2004). Dans tous les cas, les personnes concernées n'ont pas reçu d'alerte officielle sur le risque inondation. Cela montre à quel point les pouvoirs publics doivent rapidement axer leurs efforts sur des moyens d'action pour **réduire la mobilité**. Les moyens sont variés : faire prendre conscience aux riverains de la nécessité d'éviter d'emprunter telles ou telles routes

qui commencent à être submergées par les eaux ; essayer de prévoir les orages violents ; interdire la circulation à l'aide de panneaux et de feux tricolores. Ces mesurent existent déjà pour la prévision des « *crues rapides* » qui peuvent survenir dans le sud de la France.

2 - D'autres personnes peuvent se mettre en danger en restant dans leur domicile. Les gens qui ont ce type de comportement sont des habitants de longue date, connaissant bien la région, et qui n'ont jamais subi de graves inondations. Cela reflète une forte confiance en leur propre expérience : les phénomènes locaux, *« connus de mémoire d'homme »*, ne leur laissent pas imaginer qu'un jour, la crue puisse être plus grave que les précédentes. Ces personnes ont néanmoins une réaction appropriée en montant à l'étage, en attendant la fin de la crue.

L'heure à laquelle survient la crue est aussi un facteur de risque à prendre en compte. Certaines crues (16 juin 1997, 9-10 mai 2000, 1er juin 2003) sont apparues en fin de journée, entre 17 h et 18 h, période au cours de laquelle l'exposition des personnes est la plus élevée. D'autres événements se sont produits dans la soirée (vers 21 h à Estreux (59) le 8 août 2007) ou dans la nuit (vers 1h du matin à Petit-Appeville (76) le 28 juin 2005). La vulnérabilité évolue donc en fonction de l'heure d'apparition du phénomène. Une étude menée sur la crue des cadéreaux, à Nîmes (Lageard, 2000), a montré que si l'épisode était apparu en pleine nuit, l'exposition des personnes aurait été bien moindre. Cependant, la crue s'est produite vers 16 h, soit l'heure à laquelle les déplacements des populations sont les plus nombreux.

La mobilité des personnes et l'heure d'apparition des « *crues rapides* » sont donc des éléments qu'il faudrait prendre en compte si on veut prévenir efficacement un tel risque.

3.2.3. Hétérogénéité des dommages sur les 189 bassins touchés

Différentes méthodes existent pour réaliser une carte des dommages liés aux inondations (Douvinet et Agasse, 2006). Elles expriment les **dégâts potentiels sur les enjeux** (éléments sensibles aux inondations) implantés dans des zones à risque soumises à l'aléa. La création de cette carte repose sur la combinaison de données portant sur l'aléa et sur la vulnérabilité des biens et des personnes. *« Des données hydrauliques (hauteur et durée des crues) sont souvent croisées aux dégâts potentiels décrits par des courbes d'endommagement conçues sous des hypothèses simples »* (Swiss Re Report Focus, 2004). La Mission Spécialisée en Environnement (MISE, 2001) s'attache à qualifier les inondations en distinguant les *incidents*, les *accidents* et les *catastrophes majeures* par le croisement des coûts financiers et humains (tab. 3.6). Le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD) évalue l'aléa en croisant son intensité à son occurrence spatiale (tab. 3.7.). Sur le bassin de Sannerville, Meyer (2001) dissocie 4 événements (négligeables, mineurs, significatifs majeurs et catastrophiques) (tab. 3.8.) en combinant le coût des dommages matériels et des types de dégâts.

Classe	Dénomination	Dommages humains	Dommages matériels
0	Incident	aucun blessé	moins de 0,3M€
1	Accident	1 ou plusieurs blessés	entre 0,3M€ et 3M€
2	Accident grave	1 ou 9 morts	entre 3M€ et 30M€
3	Accident très grave	10 à 99 morts	entre 30M€ et 300M€
4	Catastrophe	100 à 999 morts	entre 300M€ et 3G€
5	Catastrophe majeure	1 000 morts ou plus	3G€ ou plus

M€ : million d'euros ; G€ : milliard d'euros

Tab. 3.6. Gravité des inondations selon la Mission d'Inspection de l'Environnement (MISE, 2001)

Aléa		Intensité		
		faible	moyen	fort
Occurrence spatiale	faible	faible	faible	moyen
	moyen	faible	moyen	fort
	fort	moyen	fort	fort

Tab. 3.7. Evaluation de l'aléa en croisant son intensité et son occurrence spatiale (MEDAD, 2006).

Classe	Dénomination	Dommages matériels	Types de dégâts
1	Evénement négligeable	< 10 M€	- saturations des eaux sur la chaussée ou dans des zones de cuvettes
2	Evénement mineur	entre 10M€ et 100€	- inondations de caves/maisons - interventions locales des secours - faible couverture médiatique
3	Evénement significatif	entre 100 et 1G€	- plus de 20 maisons inondées - routes inondées voire coupées - quelques caves avec >1m d'eau - plus de 100 pompiers mobilisés
4	Evénement majeur et catastrophique	1G€ ou plus	- routes coupées - population choquée - pertes humaines éventuelles - événement d'une rare violence - large couverture médiatique

M€ : million d'euros ; G€ : milliard d'euros

Tab. 3.8. Classification des événements observés en été sur le BV de Sannerville (modifié d'après Meyer, 2001).

Compte tenu des informations à notre disposition, **une grille d'évaluation spécifique** a été conçue (fig. 3.10.) pour réaliser la carte des dommages liés aux « *crues rapides* » dans les régions du nord de la France. Le coût des dégâts matériels, les dégâts humains, et la nature des sinistres (Annexe 3.1.), ont été combinés (fig. 3.9.). **La classification reste suffisamment générale** pour permettre une rapide comparaison entre les bassins versants. La vulnérabilité et l'aléa sont intrinsèquement liés car la méthode d'inventaire considère l'inondation comme un phénomène dommageable (Pigeon, 2003).

Types de dommages matériels

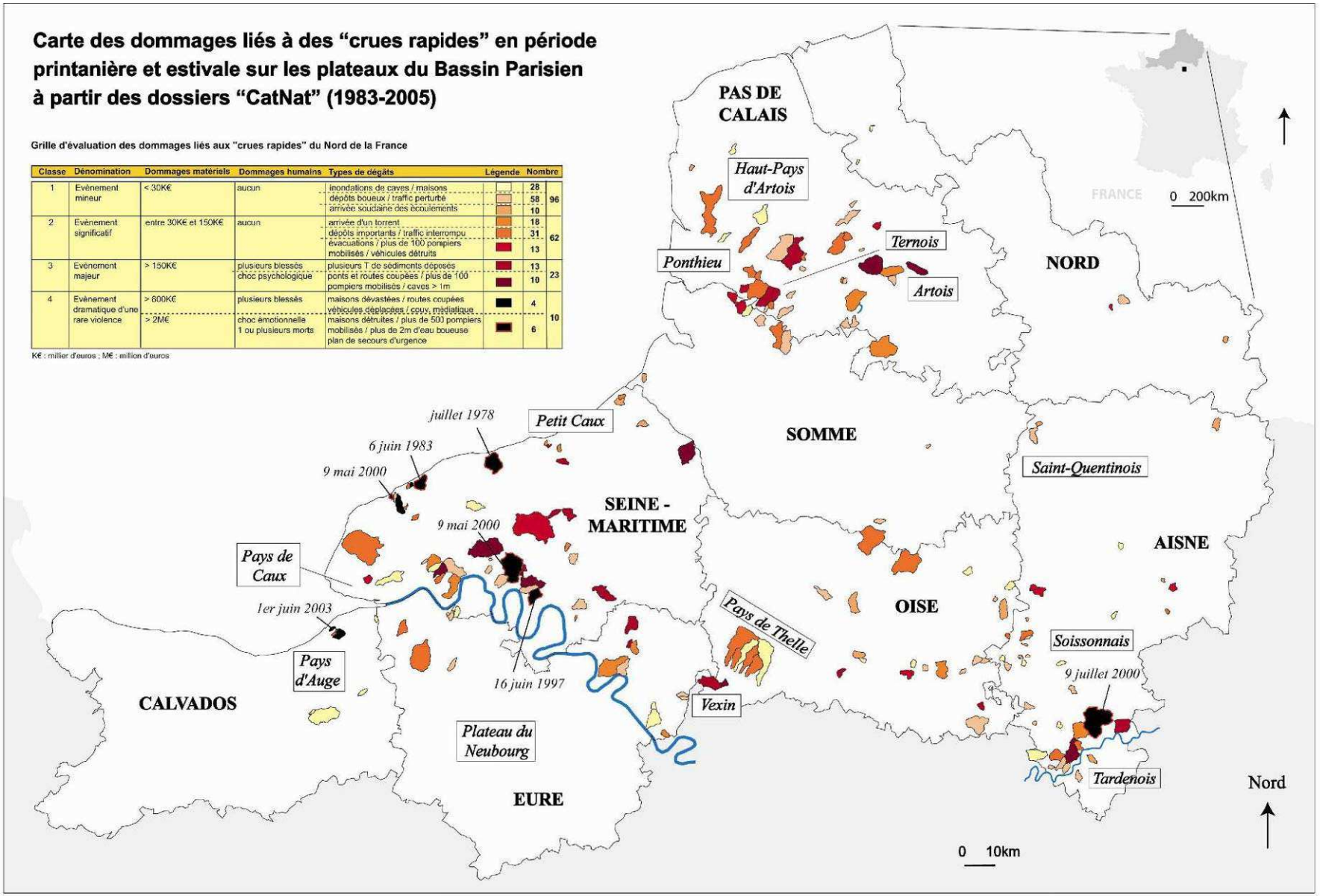
- inondations de caves
- dépôts importants (cailloux / boues / sarments de vignes)
- cours d'eau devenu un torrent
- routes / infrastructures touchées
- voitures détruites / logements saccagés / évacuations

Coûts financiers et matériels

- dégâts à faible coût (< 30K€)
- dommages matériels de 30 à150K€
- dommages matériels >150K€
- dommages matériels >600K€) et/ ou coût humain (décès) et/ou mise en péril et intervention d'urgence.

Tab. 3.9. Données disponibles à l'échelle des 189 bassins versants touchés.

La carte proposée montre des ampleurs, des coûts et une **gravité hétérogène et disparate** suivant les secteurs géographiques (fig. 3.10.). Quand plusieurs événements se sont produits sur un même bassin, la totalité des coûts et des dommages a été additionnée. **Sont recensés, au cours de la période 1983-2005, 94 événements mineurs, 62 événements significatifs, 23 événements majeurs et 10 événements dramatiques d'une rare violence.** Ces derniers sont essentiellement localisés en Seine-Maritime et dans l'Aisne (fig. 3.10.). L'intervention de plus de 500 pompiers, pour des routes coupées et des maisons inondées sous plus de 2 m d'eau, a été demandée. Les événements « *catastrophiques* » apparaissent ponctuels et non chroniques.



Document réalisé par J.Douvinet d'après les SCAN 25 © IGN de la région Nord-Pas-de-Calais / Conseil Régional de Picardie ; Agences de l'Eau Seine-Normandie / Artois-Picardie.
Convention"recherche" Ministère Intérieur / DDSC / Archives Nationales / Centre des Archives Contemporaines pour l'accès aux données 'CatNat' (1983-2005)

Fig. 3.10. Carte des dommages liés à des « *crues rapides* » (Douvinet, 2008).

L'évaluation financière des dégâts matériels rend finalement compte d'un **risque coûteux pour la société**, d'autant plus que la mobilité des personnes en déplacement au moment de la crue peut être responsable de **pertes en vies humaines. Les politiques doivent axer leurs efforts sur des outils de prévention et d'information auprès des populations locales**. Ce risque est cependant hétérogène et variable sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette pluralité pose des problèmes d'harmonisation et de prise de conscience de la présence d'un tel risque à l'échelle des régions de grande culture du nord de la France.

3.3. Regards croisés sur le risque « *crues rapides* »

Les risques sont perçus ou redoutés différemment d'un individu à un autre. Les études réalisées sur ce sujet ont montré que la perception du risque est un phénomène complexe qui peut avoir des déterminants sociaux, psychologiques, physiques, politiques et culturels (IGE, 2001 ; Ruin et Lutoff, 2004 ; Kouabenan, 2007). Les avis portant sur le risque « *crues rapides* » paraissent divergents et variables suivant les régions concernées.

Cette section propose de confronter deux avis qui paraissent récurrents :
- la presse a tendance à incriminer la composante climatique ;
- les experts scientifiques insistent sur la plus forte vulnérabilité des sociétés actuelles.

3.3.1. De la fatalité au catastrophisme journalistique …

Jusqu'à la révolution industrielle, les catastrophes relevaient de la volonté divine et de la fatalité (Dauphiné et Provitolo, 2003). La tradition orale permettait aux hommes d'avoir une certaine connaissance des événements passés qui leur permettait d'en tirer quelques règles (Vinet, 2003). « *Avec l'essor des sciences et techniques de la fin du XIX^{ème} siècle, l'homme a ressenti un besoin accru de sécurité et s'est tourné vers le scientifique pour qu'il "apaise" ses angoisses et qu'il "prédise" les catastrophes potentielles. La vague de construction massive et anarchique qui a suivi la seconde guerre mondiale a révélé l'aspect incontournable du facteur "risque naturel" : lorsque des dommages corporels ou matériels se produisaient, il fallait situer les responsabilités. Qui était en cause : l'entrepreneur, les autorités, le propriétaire… ?* » rappelle J.-P. Malet (2003).

Les sociétés actuelles ne dérogent pas à cette tradition fataliste. La moindre catastrophe relance débats et controverses sur les causes des phénomènes, les responsabilités engagées et les moyens à mettre en œuvre pour en prévenir le retour. **Elle ravive la demande sociale de protection**, qui s'exprime notamment au travers des prises de paroles dont les médias se font l'écho (Dourlens, 2001). Si toutes les catastrophes ne bénéficient pas de la même puissance d'évocation, elles sont décrites en des termes très imagés qui tentent d'en décrire la gravité.

Le phénomène climatique est perçu comme le plus « *exceptionnel* », le plus « *dramatique* » ; **la catastrophe, la « *pire* » que la société ait connu depuis bien longtemps. En général, les inondations sont grossies par les effets d'une forte médiatisation qui exagère l'ampleur des dommages en milieu urbain.** Dauphiné (2001) précise – à juste titre – qu' « *on ne dispose pas de données précises à ce sujet, mais on peut avancer, au moins à titre d'hypothèse, que la taille et la renommée des villes ont un impact sur la couverture médiatique, les autres paramètres comme la distance par rapport à la source médiatique étant supposée égale* ». Les Unes de presse sont écrites autour d'un vocabulaire axé sur la *catastrophe* et le *déluge* (tab .3.10.).

Date de parution	Titre de la Une de presse	Source (département)
10 juin 1993	*La Vallée d'Or dans l'Apocalypse*	Le Quotidien (76)
10 juin 1993	*Pluies d'orages catastrophiques ! Le Mercredi Noir !*	Paris-Normandie (76)
9 août 1995	*La Vallée du Crévon dévastée par des torrents de boue*	Paris-Normandie (76)
20 mai 1986	*Un déluge de boue en moins de 3 heures !*	L'Union (02)
16 juin 1997	*La Normandie panse ses plaies ; Le Déluge !*	Paris-Normandie (76)
9 août 1997	*Les pluies d'orage : une heure et demie de déluge !*	L'Union (02)
13 mai 1998	*Scène de désolation dans la vallée de Ganzeville !*	Paris-Normandie (76)
7 juin 1998	*La fureur du ciel dans le Ternois !*	La Voix du Nord (62)
12 mai 2000	*Vision d'apocalypse à Barentin !*	Paris-Normandie (76)
12 mai 2000	*Un torrent de boue dans les rues de Méru !*	Le Courrier Picard (62)
8 juillet 2001	*Le cauchemar d'Aizelles !*	L'Aisne Nouvelle (02)

Tab. 3.10. Titres des Unes de presse évoquant plusieurs « *crues rapides* ».

Certains journaux osent la comparaison avec les crues torrentielles du sud de la France : « *Du Vaison la Romaine à la sauce Trouvillaise* » (Ouest-France (14), édition du 1er juin 2003) ; « *Un phénomène naturel qui emporte tout, comparable à un torrent d'eau et de boue qui descend de la montagne* » (Paris Normandie (76), édition du 9 août 1995). Si les articles de presse évoquent les témoignages des riverains ayant subi la crue, le discours journalistique est souvent porté autour d'un **vocabulaire fataliste** :

[*« J'ai vu un torrent déferlant en gros rouleaux la sente Delaunay, entre les habitations »,* explique la secrétaire de mairie du Houlme (…). Le flux charriant des cailloux a traversé la route de Dieppe pour aller se jeter dans le Cailly. « *Il aurait été fou de vouloir traverser la route, on aurait été emporté* »]

(*Paris-Normandie* (76), édition du 9 mai 1988).

[Le bilan est très lourd. L'eau est montée jusqu'à 1,50 m sur les façades de certaines maisons. Les carcasses des voitures se sont empilées les unes sur les autres, écrasées contre les murs qui ont résisté (…). 2,20 m d'eau dans certains sous-sols de Villers-Ecalles et certains ont même des traces à 1,20 m dans les rez de chaussée, ce qui donne des niveaux d'inondations par la boue de plus de 3,40 m (…). Les cloisons ont été arrachées par un mobilier arrivant d'autres maisons.]

(*Paris-Normandie* (76), édition du 17 juin 1997).

[*« Nous avons couru pour aller sur la route mais le torrent était déjà sur nous (...). Poussés par le flot, nous avons atteint une allé de thuyas et un pommier. Ma femme, ma fille et mo,i nous nous sommes accrochés aux branches et mon fils s'est agrippé à la gouttière de la maison (...). C'est finalement un hélicoptère qui nous a tirés de ce déluge (...) ».* Il y avait des vaches qui passaient le ventre en l'air et un cadavre aurait pu écraser un de mes gosses. On voyait passer des balles de paille de cinq cent kilos qui rebondissaient comme des ballons, des épaves de voitures, des cuves de fuel (…). Les marcheurs s'étonnent de retrouver une Mercedes qu'ils ont vu « surfer » sur la vague de boue.]

(Paris-Normandie (76), édition du 18 juin 1997).

[L'événement est rarissime et surtout dramatique. Une seule valeur limnimétrique suffit à comprendre l'ampleur des hauteurs d'eau atteintes : les plus hautes eaux de crue datant du 9 août 1851 ont été dépassées de 0,70cm, ce qui donne une période de retour (bien approximative) de 1 à 2 siècles ! (…). Il apparaît aussi que des embâcles ont formé des retenues d'eau considérables en amont du « ru du Belle Aulne » notamment à hauteur du pont de Le Charmel. Lorsque celui-ci a lâché, les eaux ont rapidement envahi les jardins par des coulées de boue et se sont propagées jusque dans les maisons de la Place du Puits. Le niveau a atteint 1 m sur la place, mais certains témoignages estime une montée de 3 à 6 m selon les endroits.]

(*L'Union* (02), édition du 10 juillet 2000).

[Selon les endroits, on mesurait entre 1,70 m et 2,50 m d'eau dans les rues et les habitations. Une hauteur encore facilement mesurable hier matin au regard des traces noires sur le crépi d'un pavillon. Tout est allé très vite, dimanche vers 23 h 30. En une vingtaine de minutes, 1,50 m d'eau coulait dans les rues. Le village est défiguré. Au lieudit « La Grange en bois », un pont datant de l'ère romaine a même été emporté sous la force de l'eau et quelques caravanes. Petit filet d'eau en temps ordinaire, l'Ordrimouille s'était transformé en un véritable torrent (…). Quand le jour s'est levé, certains ont dit que Coincy était un petit Vaison la Romaine.]

(*L'Aisne Nouvelle* (02), édition du 10 juillet 2000).

[A peine 72 heures après le déluge de lundi soir, les habitants d'Aizelles, près de Laon, ont vécu un véritable cauchemar jeudi matin. Le petit village a été dévasté par une vague d'un mètre 20 de hauteur. « *A quatre heures du matin, on a été réveillé par l'orage. On avait peur, après les inondations de lundi. Mais à 6h30, ça a dépassé tout ce qu'on pouvait imaginé* » expliquait jeudi après-midi un habitant, encore choqué par la découverte des dégâts. En effet, en quelques minutes, le ciel s'est assombri et des bourrasques violentes mêlées de pluie et de grêlons se sont abattues. Les rues du village ont été noyées sous 60 centimètres d'eau ! Et par endroit, cette commune se situant à flanc de colline, c'est un véritable torrent de boue qui a dévalé les rues.]

(*L'Aisne Nouvelle* (02), édition du 8 juillet 2001).

[Dans la panique, la jeune femme tente de garder son sang froid et choisit de laisser les phares de sa voiture allumés, et de klaxonner. *« Je voyais la lumière des sapeurs pompiers, mais ils ne me trouvaient pas »*. Avec le temps, la panique monte. L'orage s'est arrêté mais pas le déferlement d'eau et de boue. « *Quelque chose est venu cogner mon pare-brise. Il s'est fêlé. Si autre chose avait tapé, il aurait cassé, mais je ne pouvais toujours pas sortir* » se souvient … qui avoue avoir eu la peur de sa vie. Se fiant au klaxon, les sapeurs-pompiers finissent par sortir la jeune conductrice de sa voiture. Elle n'aura pas une égratignure, même si les séquelles psychologiques apparaissent depuis l'accident : *« Je dors de moins en moins bien et j'en rêve toutes les nuits. Et surtout, j'ai peur en voiture. Même à la place passager, je ne peux pas regarder la route* ».]

(*Les Infos dieppoises* (76), édition du 1er juillet 2005) [76].

Si le risque est réel, le manque d'objectivité de la source journalistique constitue un frein à une analyse précise et exhaustive de ces événements. Les politiques des comités de rédaction et les partis pris des journalistes influencent le contenu et la tonalité des articles. Des ruissellements atteignant 30 cm de hauteur sont perçus comme des « *catastrophes* » dans les régions où ils apparaissent très rarement (Calvados, Eure, Nord). Ce genre d'écoulement est en revanche perçu de manière moins dramatique dans les régions où les inondations sont fréquemment observées (Aisne, Seine-Maritime). **Quelle que soit la région, la composante climatique reste néanmoins perçue comme la principale responsable de ces crues.**

3.3.2. Réponse des expertises scientifiques

Plusieurs études se sont attachées à quantifier la *vulnérabilité* des sociétés dont il a été fait mention auparavant (§ 3.2.). La vulnérabilité dite « *analytique* » fait le lien entre l'exposition des biens et des personnes et l'aléa. Elle traduit surtout la vulnérabilité d'un lieu qui dépend de la manière dont s'y sont installés les hommes et de leur concentration dans l'espace à un moment donné. **En allant dans ce sens, la vulnérabilité suggère une fragilité territoriale et contextuelle de la société par rapport à l'aléa** (Veyret et Garry, 1998).

L'augmentation du nombre de catastrophes est sans doute plus liée à la vulnérabilité croissante des espaces bâtis qu'à une augmentation des aléas. Sous la pression foncière liée à la rurbanisation, la vulnérabilité n'a cessé de croître au fil des années (fig. 3.11.). Les bourgs situés dans les fonds de vallées déjà très largement peuplés (Auzet *et al.*, 1995 ; Angeliaume, 1996 ; Meyer, 2001), ont continué de se développer sous forme de lotissements. Les plateaux étant déjà occupés par les constructions les plus anciennes, ces extensions se sont faites soit

dans l'axe des talwegs (terrain plat, axe de circulation vers le plateau, méconnaissance des risques dans le fond de vallon, proximité de vastes zones boisés), soit directement en zone inondable (Delahaye, 2002). « *Il semble que la croissance économique et la pression démographique soient à l'origine de l'augmentation des dégâts par l'étalement nécessaire des villes et la concentration des habitations* » (Latruffe, 2000). « *On assiste à la construction de lotissements qui grignotent les talwegs des vallons secs, la plaine alluviale étant sujette à des inondations fréquentes* » (Angeliaume, 1996). Ce constat est transposable à de nombreuses vallées du Pays de Caux (fig. 3.11b).

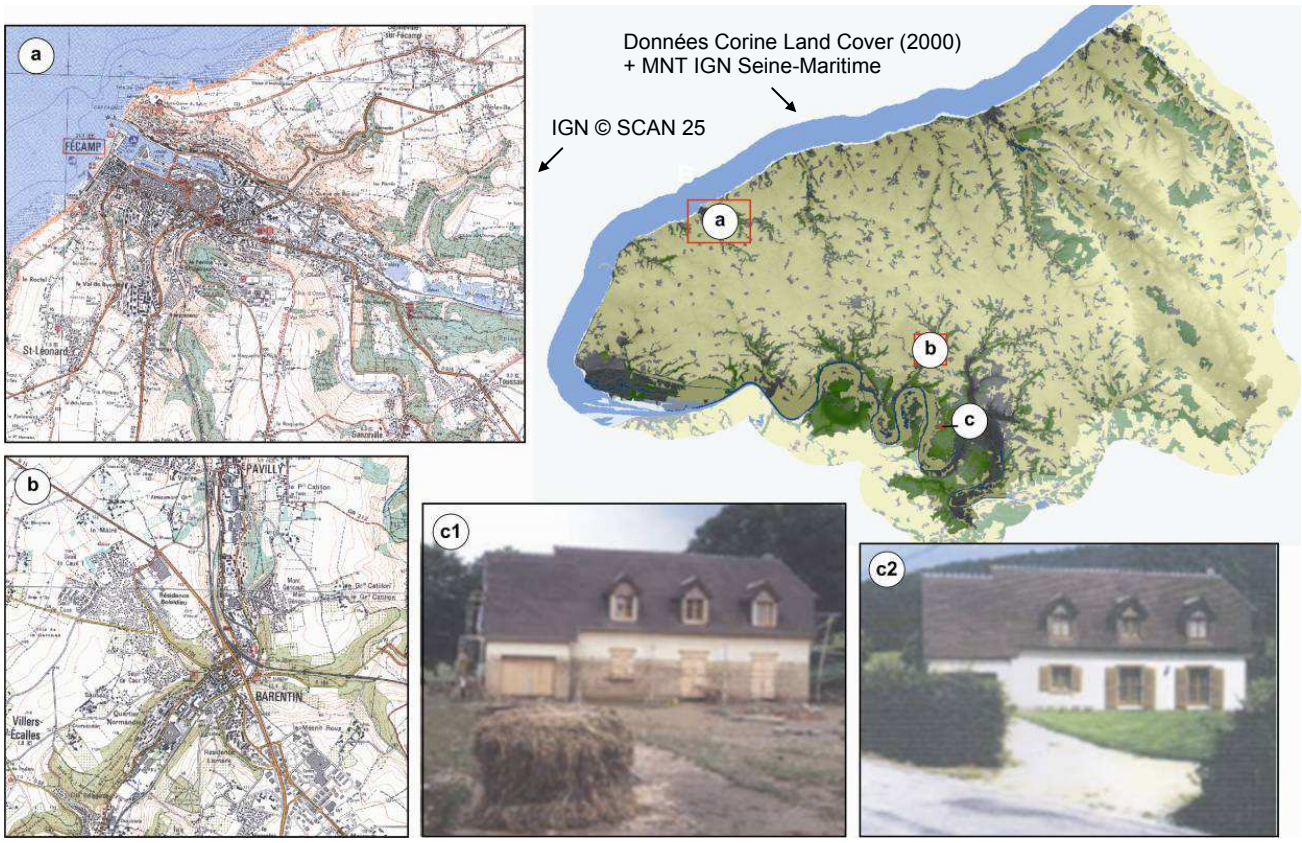
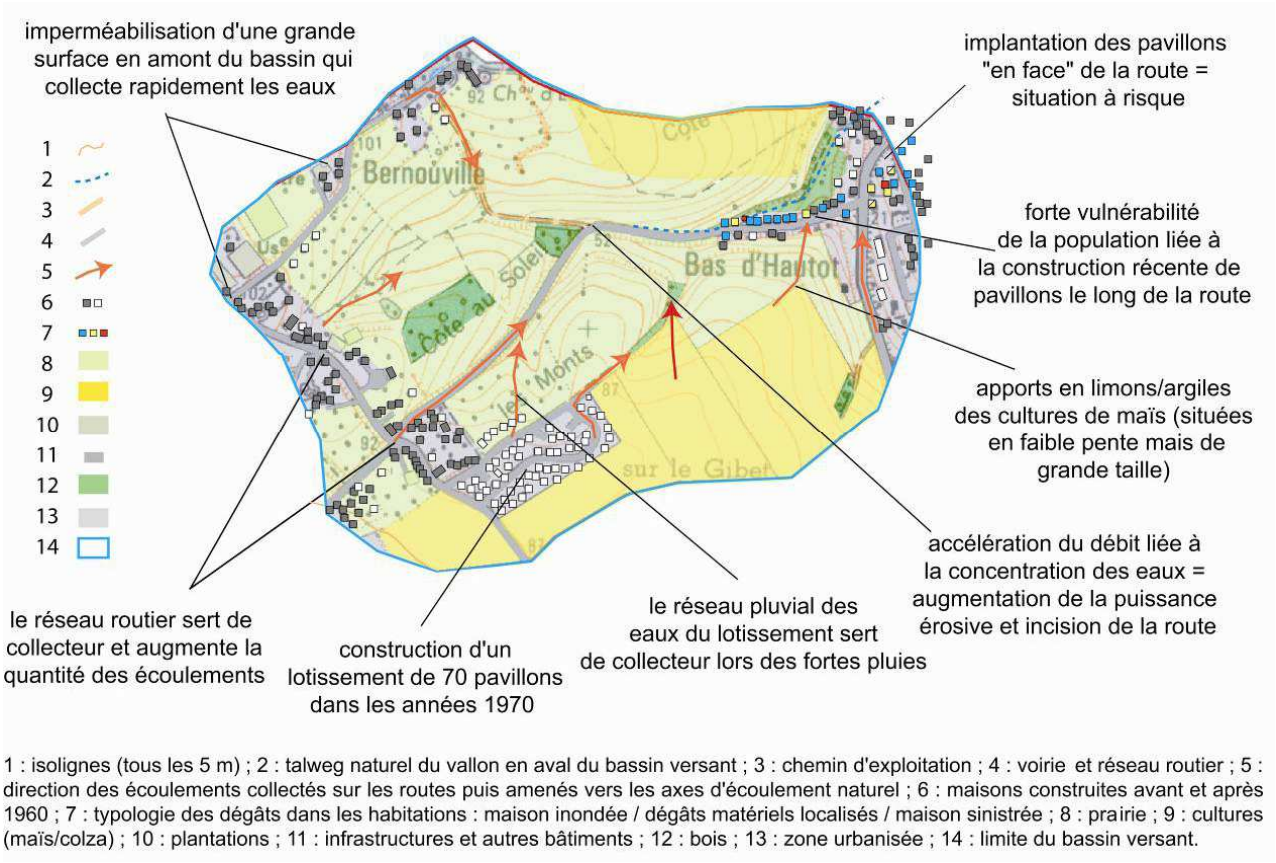


Fig. 3.11. a et b) Implantation puis croissance des villes dans les fonds de vallée ; **c)** Une maîtrise de la vulnérabilité difficile : un pavillon touché en 1997 (**c1)** mais toujours présent en 2002 **(c2**).

Certaines crues montrent que l'habitat construit après 1970 est systématiquement touché. A titre d'exemple, sur les 14 M € de dégâts provoqués par la crue du 16 juin 1997 à St-Martin-de-Boscherville (76), 50 % concernent des maisons construites lors des 30 dernières années (IGE, 2001). La vulnérabilité de ces espaces n'est pas nouvelle : **l'exposition est renforcée car l'extension de l'urbanisation y est presque inéluctable**. Dans le Pays de Caux, D. Delahaye (2002) souligne que de nombreuses maisons du XIX^{ème} siècle sont touchées ; en revanche le bâti du XVIII^{ème} siècle semble moins exposé car très souvent, les bâtiments agricoles de cette époque se trouvent en position dominante ou sont dotés d'entrées surélevées.

Le problème est cependant un peu plus compliqué : si les implantations récentes ont une large part de responsabilité dans les conséquences des crues, l'habitat ancien, qui autrefois était épargné, peut devenir sinistré, comme ce fut le cas à Barentin en 2000, ou à Hautot sur Mer en juin 2005. Les habitations situées dans Petit-Appeville, à l'exutoire du vallon, ont été construites au début du siècle. Les maisons ont ensuite été implantées le long de la route, la Cavée d'Hautot, accroissant l'exposition du bâti de manière importante (fig. 3.12.).

Le rôle de la voirie n'est pas dissociable du thème de la vulnérabilité. Le paléo-réseau raccordant les plateaux aux grandes vallées était le lieu idéal pour l'implantation du réseau routier. Les routes s'encaissent dans les talwegs de ces vallons, courts et étroits, de manière plus ou moins brutale. La toponymie des routes témoigne de la présence de ces déclivités : les « *Cavées* », « *Les Fonds* », les « *Ravines* », les « *Avalasses* » (Meyer, 2001). Ces routes sont les plus endommagées. **Elles posent surtout un réel problème de sécurité pour les personnes mobiles qui se trouvent sur ce réseau lors de l'arrivée de la « *vague de boue* ».**



1 : isolignes (tous les 5 m) ; 2 : talweg naturel du vallon en aval du bassin versant ; 3 : chemin d'exploitation ; 4 : voirie et réseau routier ; 5 : direction des écoulements collectés sur les routes puis amenés vers les axes d'écoulement naturel ; 6 : maisons construites avant et après 1960 ; 7 : typologie des dégâts dans les habitations : maison inondée / dégâts matériels localisés / maison sinistrée ; 8 : prairie ; 9 : cultures (maïs/colza) ; 10 : plantations ; 11 : infrastructures et autres bâtiments ; 12 : bois ; 13 : zone urbanisée ; 14 : limite du bassin versant.

Fig. 3.12. Une sensibilité sociale en constante augmentation. Période de construction et rôle joué sur la cinématique des écoulements lors de la crue du 28 juin 2005 à Hautot-sur-Mer (76).

La maîtrise de la vulnérabilité est devenue un enjeu capital. La croissance des espaces urbanisés s'accompagne d'une multiplication des enjeux, et la densité des infrastructures et des réseaux accroît les pertes potentielles lors de la survenue des *« crues rapides »*.

Les maisons les plus contraintes au ruissellement devraient être déplacées en dehors des trajectoires préférentielles des écoulements. **La disparition de la vulnérabilité entraînerait en effet la disparition du moindre risque**. Cependant, ce type de mesure reste onéreux et difficile à envisager car il pose d'importants problèmes en terme de réglementations sur les constructions existantes (fig. 3.11). Les acteurs institutionnels adoptent, en dernier recours, le discours de la *« culture du risque »*, en axant leurs efforts sur les outils d'information et de prévention, à la place de la vision prospective des décennies précédentes (Langumier, 2007).

Conclusions du chapitre 3

L'analyse de la distribution temporelle des « *crues rapides* » (1983-2005) permet d'estimer l'activité de ces phénomènes. Elle montre que :

- **80 % des événements ont été recensés entre 1992 et 2001 ;**
- **68 % des bassins versants identifiés ont été touchés une seule fois entre 1983 et 2005 ;**
- **la distribution temporelle des événements est variable sur les huit départements** ; on remarque que 64 % des crues localisées en Seine-Maritime ont été recensées entre 1997 et 2001, tandis que les phénomènes déclarés dans l'Aisne l'étaient déjà avant 1990.

La **phase d'augmentation** (1992-2001) n'est pas observée depuis ; les événements ne sont donc pas en constante augmentation. Deux hypothèses sont à vérifier : soit les pluies ont été plus nombreuses et plus violentes durant cette période ; soit les épisodes orageux, de même intensité, ont touché des secteurs plus vulnérables. La première hypothèse est partiellement fausse puisqu'une étude menée par D. Delahaye (2002) sur les structures pluviométriques et leur évolution, entre 1970 et 2001, ne montre pas d'évolution significative en Seine-Maritime. Elle devra néanmoins être vérifiée sur l'ensemble des huit départements étudiés.

L'analyse spatiale permet ensuite de montrer l'**existence d'un gradient spatial qui guide la répartition temporelle des événements.** Une certaine « *saisonnalité* » est remarquée entre le mois de juin (ouest de la zone d'étude), de juillet (partie intermédiaire) et d'août (est). La deuxième décade de mai et la première de juin sont les deux périodes les plus propices à l'apparition des catastrophes avérées. Une étude des relations entre le forçage climatique et l'occurrence spatiale et temporelle des « *crues rapides* » s'avère nécessaire si on souhaite poursuivre l'analyse.

L'évaluation des dommages matériels et humains participe également à une meilleure caractérisation du risque « *crues rapides* ». L'ampleur des sinistres est variable d'un secteur à un autre, voire au sein d'un bassin versant touché plusieurs fois. Les événements ponctuels paraissent « *catastrophiques* » tandis que les événements chroniques sont moins intenses. Les montants des dégâts atteignent des sommes considérables en regard de la petite taille des surfaces touchées. Ces coûts seraient difficilement supportables pour les communes sans la procédure « *CatNat* ».

La carte de synthèse montre l'existence d'un **risque disparate** sur les huit départements, ce qui explique, en partie, les différences de perceptions dans les documents administratifs et réglementaires. Alors que les articles de presse incriminent la fatalité divine et la composante climatique, plusieurs études suggèrent une sensibilité plus accrue à cause de l'exposition des biens et des personnes qui est devenue plus forte aujourd'hui. La vulnérabilité n'a cessé de croître sous l'effet conjugué de la mobilité des personnes et la croissance démographique. **En s'étalant sur des « *espaces à risque* », l'homme s'est ainsi lui-même exposé de manière plus importante à l'aléa.**

Synthèse de la première partie

Ce tour d'horizon des connaissances actuelles a permis de faire un point à propos du fonctionnement des « *crues rapides* » apparaissant en périodes printanière et estivale dans les régions de grande culture du nord de la France.

► Un mode de fonctionnement particulier

Ces « *crues rapides* » se caractérisent par des **écoulements torrentiels** qui se manifestent aux exutoires urbanisés de petits bassins versants ruraux (< 60 km²). La plupart du temps, les bassins *(« vallons secs »)* sont dépourvus d'écoulement pérenne, ce qui en fait leur originalité par rapport aux autres inondations rencontrées dans ces régions. Seulement 18 % des bassins recensés sont finalement drainés par un cours d'eau permanent.

Les dégâts occasionnés sont systématiquement « *catastrophiques* ». Ils se traduisent par des routes coupées, des ruptures du tablier routier, des voitures emportées, etc., pouvant parfois occasionner des pertes en vie humaine. Les écoulements acquièrent suffisamment de compétence pour engendrer des incisions majeures et ce, même sur de courtes distances.

Les débits spécifiques sont élevés par rapport à la petite taille des bassins. La montée des eaux et la propagation des « *vagues de boue* » sont extrêmement rapides (en moins d'1 h), ce qui justifie l'utilisation du terme « *crues rapides* », même si ces événements se produisent dans le nord de la France. Le **ruissellement hortonien** est la seule source d'alimentation possible des crues et la filiation avec l'érosion des sols est plus qu'évidente puisque les intensités des pluies dépassent rapidement les capacités d'infiltration des sols.

► Apports et contraintes de l'échantillonnage

L'inventaire réalisé à partir des dossiers « *CatNat* » a permis de travailler directement sur les « *crues rapides* » qui ont occasionné des dommages sur les populations. On s'intéresse au phénomène inondation, coûteux et dommageable, et non au phénomène naturel, l'aléa.

Cet effort d'échantillonnage s'oppose à un certain nombre de contraintes : les évènements **déclarés** sont uniquement ceux qui ont donné lieu à une reconnaissance de l'état « *catastrophe naturelle* » ; le recensement ne peut tenir compte des changements de mentalité des maires par rapport à cette procédure d'indemnisation ; la prise de décision de l'arrêté est politique ; le seuil de reconnaissance est liée à l'intensité des pluies et non aux coûts des dégâts.

En tenant compte des limites de cet inventaire, l'inventaire montre néanmoins que :
- 8,5 bassins sont touchés en moyenne par an sur une surface de ~ 50 000 km² ;
- **189 bassins versants** sont reconnus comme « *touchés* » dans les départements étudiés ;
- des bassins ayant été touchés à plusieurs reprises**, ce sont finalement 269 événements « *crues rapides* » qui sont observés dans ces régions du nord de la France ;**
- **302 communes ont réellement subi des dommages associés à des « *crues rapides* »** ;

L'analyse de la distribution spatiale et temporelle des « *crues rapides* » (1983-2005) permet ensuite d'estimer l'activité de ces **évènements déclarés**. On remarque ainsi que :

- 80 % des événements ont été recensés entre 1992 et 2001 ;
- 68 % des bassins versants identifiés ont été touchés une seule fois entre 1983 et 2005 ;
- les « *crues rapides* » déclarées sont souvent recensées au début des mois de mai et juin ;
- **la distribution temporelle des événements est variable sur les huit départements** ; on remarque que 64 % des crues localisées en Seine-Maritime ont été déclarées entre 1997 et 2001, tandis que les phénomènes étaient déjà recensés dans l'Aisne avant 1990.

► La réalité du risque « *crues rapides* »

L'évaluation des dégâts matériels et humains participe à une meilleure **caractérisation** du risque « *crues rapides* ». Si l'ampleur des sinistres reste variable d'un secteur à un autre, les événements ponctuels sont plutôt « *catastrophiques* » ; à l'inverse, les événements chroniques, moins intenses, semblent plus fréquents sur les bassins drainés. Le montant des dégâts (entre 500 k € et 15 M €) peut atteindre des **sommes considérables** par rapport à la petite taille des surfaces touchées. **La carte de synthèse confirme toutefois l'existence d'un risque disparate sur les huit départements étudiés.**

Cette disparité dans l'ampleur et l'intensité des dommages est à corréler à l'importance des enjeux et à la localisation des espaces urbanisés par rapport aux axes majeurs des écoulements. Si la presse a tendance à incriminer l'aléa pluviométrique comme responsable de l'apparition de ces « *crues rapides* », il semble plutôt que ce soit l'intensification des enjeux et l'étalement urbain, notamment aux exutoires des « *vallons secs* », qui en soient à l'origine.

La répartition spatiale des bassins touchés indique aussi **la sensibilité accrue de certains secteurs géographiques**, en particulier le Pays de Caux, les collines de l'Artois, les secteurs à corniche du Soissonnais. L'inventaire fournit un échantillon de 189 bassins sur lesquels une approche comparative doit être menée pour détecter d'éventuels **critères de sensibilité.** On souhaite également mieux comprendre comment on passe de ruissellements locaux, observés à l'échelle parcellaire, à la formation des « *crues rapides* » surgissant aux exutoires des bassins versants. **L'analyse des facteurs de déclenchement ou de prédisposition doit contribuer à une meilleure connaissance sur l'occurrence d'un tel risque.**

Partie II

Seuils de déclenchement et facteurs de prédisposition aux « *crues rapides* »

Introduction de la deuxième partie	**p. 100**
Chapitre 4 – Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques	**p. 101**
Chapitre 5 – Caractéristiques morphologiques et portraits types de bassins sensibles	**p. 133**
Chapitre 6 – Influence de l'occupation du sol sur la sensibilité des bassins touchés	**p. 157**
Synthèse de la deuxième partie	**p. 185**

Bv d'Auchy-les-Hesdin – 07 juillet 2001
Source : dossiers « *CatNat* »

Introduction de la deuxième partie

L'état des connaissances de la première partie a permis de faire un point sur le mode de fonctionnement des « *crues rapides* ». Trois aspects semblent encore peu étudiés :

- **l'aléa pluviométrique :** La dynamique spatio-temporelle des pluies de forte intensité mérite d'être étudiée pour mieux caractériser le forçage climatique et sa variabilité dans les régions du nord de la France. L'apparition des « *crues rapides* » est-elle associée à un système pluvieux spécifique ? Les orages sont-ils plus intenses et/ou plus fréquents dans certains secteurs ? Quelle est l'influence des facteurs géographiques locaux ?

- **la morphologie** : L'incidence de ce paramètre a souvent été minorée dans ces régions de plateaux à faible dénivelée. Plusieurs travaux (Hauchard, 2001; Delahaye, 2002) ont mis en évidence l'importance des systèmes de pentes au sein des bassins et le rôle joué par l'organisation des réseaux de talwegs. Les bassins présentent-ils alors des caractéristiques morphométriques spécifiques ? Un portrait-type peut-il être défini sur les 189 bassins ?

- **l'occupation du sol :** Elle a un rôle fondamental sur la dynamique du ruissellement. Son influence a souvent été mise en avant mais, de manière surprenante, plusieurs crues sont apparues sur des bassins où la part des cultures est faible à l'échelle globale. La part des terres cultivées est-elle alors un facteur prépondérant ? Comment expliquer la genèse de « *crues rapides* » sur des vallons majoritairement infiltrants ?

L'objectif de cette deuxième partie est d'analyser chaque composante de manière fine afin de détecter des seuils de déclenchement et de mettre à jour des critères de sensibilité. L'identification du rôle joué par chacune des trois variables est une première étape vers une meilleure compréhension de la complexité des processus étudiés. L'approche a été menée à différentes échelles spatio-temporelles, en allant de la plus fine à la plus large possible.

Cette partie s'organise de manière à répondre aux deux questions suivantes :
- quelle est l'influence du facteur de déclenchement (**chapitre 4**) ?
- quelle est la sensibilité des facteurs prédisposants que sont la morphologie (**chapitre 5**) et l'occupation du sol (**chapitre 6**) ?

Chapitre 4

Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « *crues rapides* » (1983-2005) dans le nord de la France

Introduction	**p. 102**
4.1. Caractéristiques des pluies à l'origine des « *crues rapides* »	**p. 103**
4.2. Etude du seuil de déclenchement des phénomènes	**p. 107**
4.3. Evolution de l'aléa pluviométrique (1983-2005)	**p. 122**
4.4. Types de circulations associées aux « *crues rapides* »	**p. 124**
Conclusions du chapitre 4	**p. 131**

Image radar (25 juillet 2006)
Source : Météo France - réseau ARAMIS

Introduction

Les « *crues rapides* » printanières et estivales du nord de la France apparaissent à la suite de pluies de forte intensité. Les cumuls de pluies sont généralement élevés (> 50 mm) et ils tombent sur une durée relativement courte (< 15 h). Le forçage climatique n'est pourtant pas si **simple à évaluer** dans ces régions de plateaux car tous les épisodes pluvieux n'entraînent pas forcément des « *crues rapides* » (Demay, 2000 ; Laganier, 2000). Ces crises hydrologiques peuvent également apparaître à la suite de plusieurs passages pluvieux successifs (9 et 10 mai 2000 par exemple). Dans ce cas-là, plus que la hauteur d'eau quotidienne, c'est le cumul des pluies sur les jours précédents qui pourrait expliquer l'apparition de ces événements.

Ce chapitre a, dès lors, pour objet de répondre aux questions suivantes :

► **les épisodes orageux associés à des « *crues rapides* » sont-ils homogènes ?** Si **oui**, ces phénomènes sont originaux, fondamentalement distincts des processus hivernaux, et leur apparition est totalement dépendante de l'aléa pluviométrique. Si **non,** la pluie est une condition nécessaire mais pas suffisante pour le déclenchement de ces crues ;

► **quel est le seuil pluviométrique nécessaire à l'apparition des « *crues rapides* » ?**

► **les orages apparaissent-ils plus fréquemment dans certains secteurs privilégiés ?** Afin de répondre à cette question, il s'avère nécessaire d'analyser la récurrence des pluies de forte intensité et de mesurer le poids des facteurs géographiques ;

► **l'étude des pluies de forte intensité peut-elle expliquer la plus forte recrudescence d'événements au cours de la période 1992-2001 ?**

► **quelles sont les situations synoptiques à l'origine des épisodes de « *crues rapides* » ? Sont-elles toutes associées à des situations fortement pluviogènes ?**

La dynamique des abats pluviométriques générant les « *crues rapides* » n'a jamais fait l'objet d'une étude à échelle fine dans ces régions. La démarche retenue repose sur une analyse à plusieurs niveaux : étude des pluies à l'origine des « *crues rapides* » (§ 4.1.) ; mise en évidence du seuil de déclenchement des phénomènes (§ 4.2.) ; analyse de l'évolution de l'aléa pluviométrique (§ 4.3.) ; caractérisation des types de circulations associées à ces crues (§ 4.4.).

Cette approche doit permettre de mettre à jour l'influence des facteurs géographiques et le poids de la variable climatique sur le déclenchement des « *crues rapides* ». Elle devrait aussi apporter des éléments de réponse sur la variabilité des pluies de forte intensité, et fournir les bases nécessaires au développement d'un système d'alerte approprié à ce type de risque[1].

[1] Plusieurs études ont déjà été menées en France pour répondre à des problématiques communes à ce travail. Le *Programme MAP (Alpin Méso-Echelle)* tente d'améliorer la prévision des pluies intenses dans le temps et dans l'espace sur les Alpes afin de pouvoir donner l'alerte de manière efficace (Bourgeault *et al* 2001 ; Pradier, 2002). Le projet *HERA (HEavy pRecipitation in the Alpine region)* a pour but d'estimer les chutes de pluie sur le massif alpin pour pouvoir anticiper le risque éventuel d'inondation (Volkert, 2000). D'autres projets tentent de relier les pluies intenses et les crues éclairs en région de moyenne montagne méditerranéenne. Le Projet *MEDEX (MEDiterranean EXperiment)* fédère la communauté météorologique sur les épisodes pluvieux à forts impacts sociétaux tels que sécheresses, inondations, mouvements de terrain (Jansa *et al.*, 2007). On peut aussi citer le programme *CYPRIM* (*CYclogenèses et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne)* qui s'intéresse à la formation et au développement des masses d'air convectives (Anquetin *et al*., 2003). Des progrès sensibles sont attendus dans la mise en place d'un système d'alerte à l'échelle internationale avec le programme *THORPEX* (Bourgeault *et al*, 2001). L'étude la plus proche de nos thématiques est le projet *COPS (Convective and Orographically-induced Precipitation Study*) qui porte sur les masses d'air en déplacement et sur les mécanismes de formation des pluies orageuses sur les Vosges et la Forêt-Noire. Les résultats de ce programme, lancé en 2007, sont attendus pour fin 2009…

4.1. Caractéristiques des pluies à l'origine des « *crues rapides* »

L'accès aux dossiers « *CatNat* » a permis de connaître le **volume** et la **durée des épisodes pluvieux à l'origine des « *crues rapides* ».** Un rapport météorologique est rédigé par Météo France afin de vérifier si les pluies relevées à proximité des communes qui font la demande de reconnaissance de l'état de « *catastrophe naturelle* » sont supérieures (ou non) à la valeur décennale. La prise de décision repose ainsi sur les courbes Intensités / Durées / Fréquences (*courbes IDF*) des stations du réseau officiel. Le cas échéant, lorsque les stations sont éloignées des zones touchées, les données des stations bénévoles ou des particuliers (agriculteurs) et l'imagerie radar sont ajoutées au dossier. L'expert a ensuite pour mission de statuer sur le seuil de reconnaissance en croisant les différentes données mises à disposition.

4.1.1. Des cumuls de pluies élevés (> 50 mm) sur de courtes durées (< 15 h)

Contrairement aux idées reçues, les pluies à l'origine des « *crues rapides* » survenues dans les régions du nord de la France sont « *extrêmes* » au sens défini par Muller (2006). Les pluies cumulées varient entre 50 et 200 mm sur quelques heures seulement. **Dans 80 % des cas, les précipitations sont supérieures à 40 mm** (fig. 4.1.). Les stations du réseau officiel de Météo France, ont parfois mesuré des intensités remarquables (fig. 4.3.) : 78,9 mm ont, par exemple, été mesurés en 1 h par la station de Deauville (14) le 1er juin 2003 (fig. 4.2.), ce qui donne une hauteur de pluies de 127,8 mm sur 15 h glissantes. On peut également mentionner d'autres intensités : 24 mm en 8 minutes relevés à Ault (80) le 11 juin 1997 ; 52,8 mm en 45 minutes à Nouy en Thelle (60) le 25 août 1990 ; 89,8 mm mesurés en 3 h 26 par la station de Jaméricourt (60) le 2 juillet 1993 ; 196 mm en 2 jours à Rouvroy en Santerre (80) le 6-7 juillet 2001, etc.

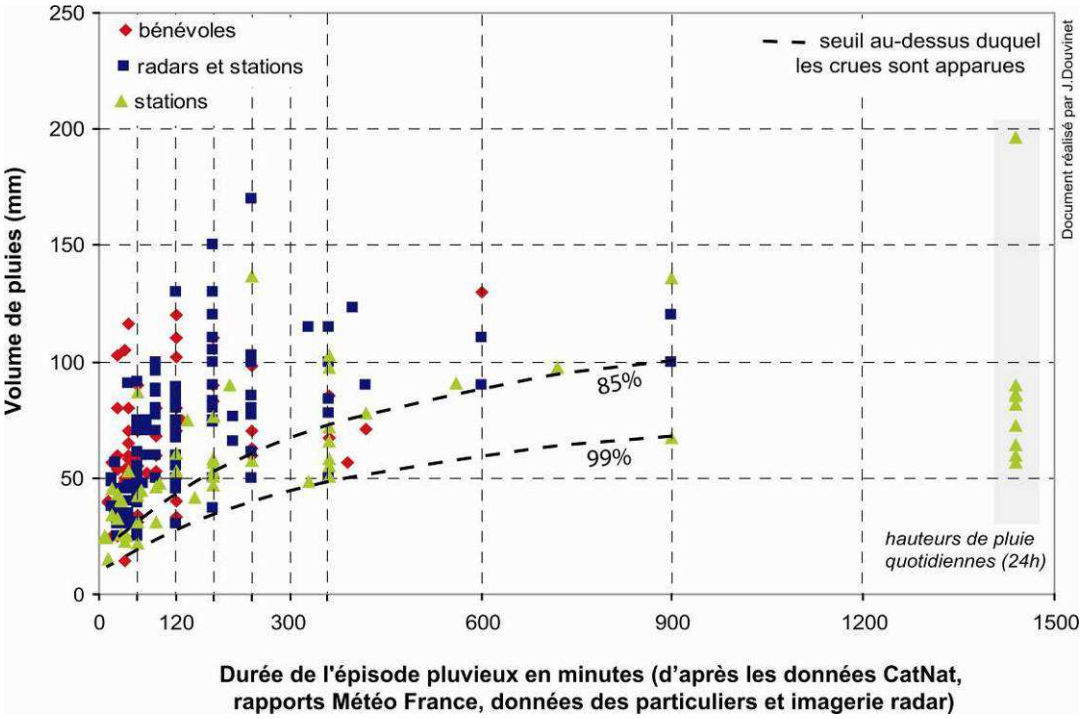


Fig. 4.1. Cumuls et durées des pluies à l'origine des « *crues rapides* » (1983-2005).

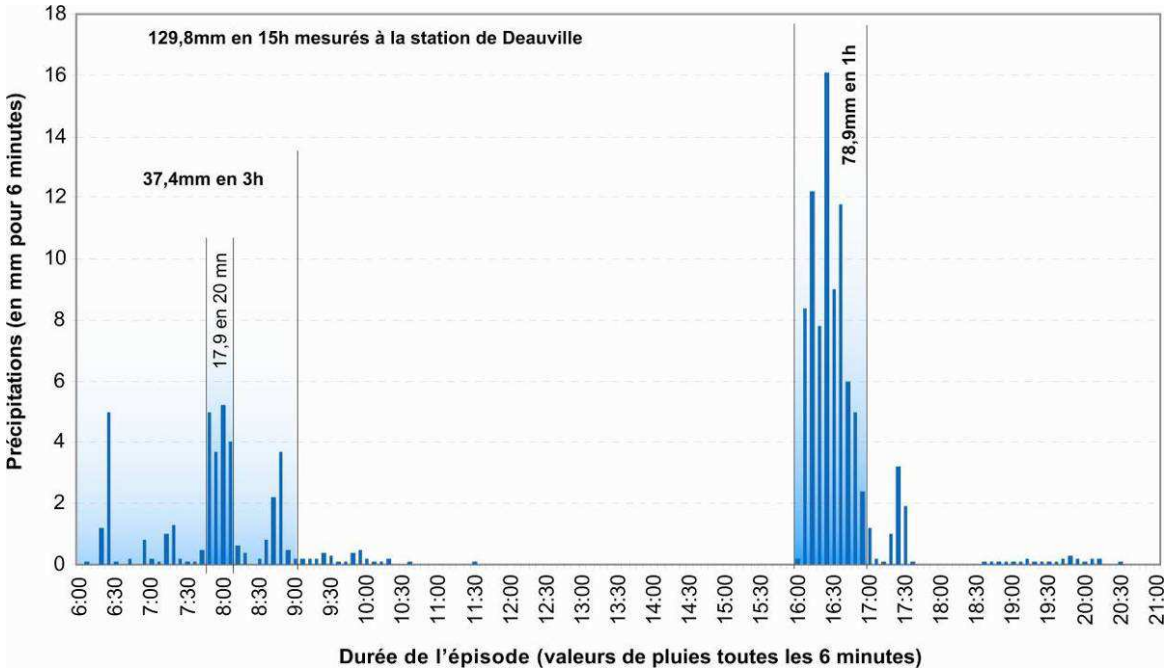


Fig. 4.2. Pluies enregistrées le 1er juin 2003 à la station de Deauville (Douvinet, 2004).

Les stations officielles ne se situent pas toujours sous les épicentres les plus pluviogènes. Il est souvent nécessaire de recourir aux images radar pour affiner les valeurs sur des pas de temps plus fins. Les lames d'eau estimées à partir des images radars (les stations du réseau ARAMIS) améliorent la connaissance des hauteurs de pluies à l'origine des « *crues rapides* » (fig. 4.3b) mais elles ne couvrent pas toute la période d'étude (1983-2005). Les relevés des particuliers donnent des valeurs plus précises, mais non validées (fig. 4.3c.). Ces derniers indiquent pourtant les intensités les plus élevées : 48 mm en 40 minutes le 24 juin 1983 ; 103 mm en 30 minutes le 18 mai 1993 ; 64 mm en 4 h le 21 août 2001, etc. **Au final, ces données permettent de mieux cerner l'intensité des pluies à l'origine de ces crises hydrologiques.**

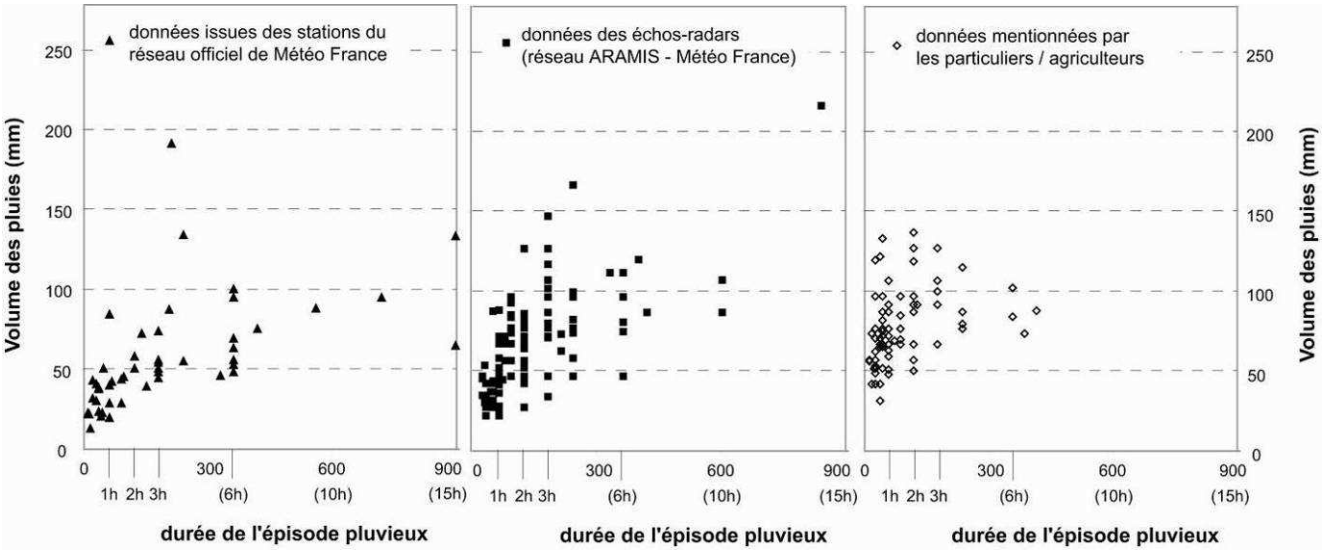


Fig. 4.3. Cumuls et durées des pluies relevées **a)** sur les stations du réseau officiel, **b)** d'après les images radars ; **c)** sur les stations bénévoles et/ou des agriculteurs (d'après données CatNat).

4.1.2. Deux types d'épisodes pluvieux distincts

Différents épisodes pluvieux sont associés aux « *crues rapides* ». Il convient de différencier **les phénomènes pluviométriques affectant de grands espaces géographiques** (disposition linéaire associée aux passages de fronts froids actifs par exemple) et **les épisodes localisés sur des espaces bien plus restreints** (disposition concentrique des pluies liées à des facteurs locaux, transformant le potentiel instable en averses ou en orages).

Une **typologie** est proposée sur les épisodes pluvieux à l'origine des **269 événements** « *crues rapides* ». Initialement, l'inventaire réalisé à l'échelle départementale avait recensé 121 épisodes (chapitre 3), mais des épisodes communs à plusieurs départements ont été comptés plusieurs fois. En enlevant les doublons, on retient **79 épisodes** que l'on peut ainsi dissocier :

- 20 épisodes majeurs à forte extension spatiale ont été détectés par les postes du réseau officiel et par les stations bénévoles (fig. 4.4.). Les cumuls de pluies, supérieurs à 60 mm sur une ou plusieurs stations (tab. 4.1.) ont été à l'origine de **118 événements**, soit 44% des 269 crues recensées. Ces épisodes présentent une plus grande extension géographique, ce qui explique qu'ils soient détectés par les postes pluviométriques et que le nombre de bassins touchés soit plus élevé, avec une moyenne de 5,9 bassins touchés par épisode ;

- 48 épisodes pluvieux ont affecté des espaces géographiques plus localisés. On peut dissocier cette catégorie en deux sous-groupes : certains épisodes ont été détectés par une ou plusieurs stations (19) ; les autres sont principalement détectés par les stations des bénévoles ou par les particuliers, et ils sont confirmés par les radars (29). Les épisodes sont ponctuels et de courte durée, et ils présentent une faible extension géographique, sans réelle organisation. Les intensités peuvent parfois être très élevées : 34 mm en 15 minutes mesurés à Monthiers (02) le 29 août 2003 par exemple. Bien que le nombre total d'événements (**139 crues**) soit plus élevé, le nombre de bassins touchés par épisode (une moyenne de 2,9) est plus faible que pour les épisodes précédents ;

- 11 épisodes sont exclus de cette typologie car aucune donnée de pluie n'a été recueillie dans les dossiers « *CatNat* » (fig. 4.4.) pour ces épisodes qui ont entraîné **12 crues**.

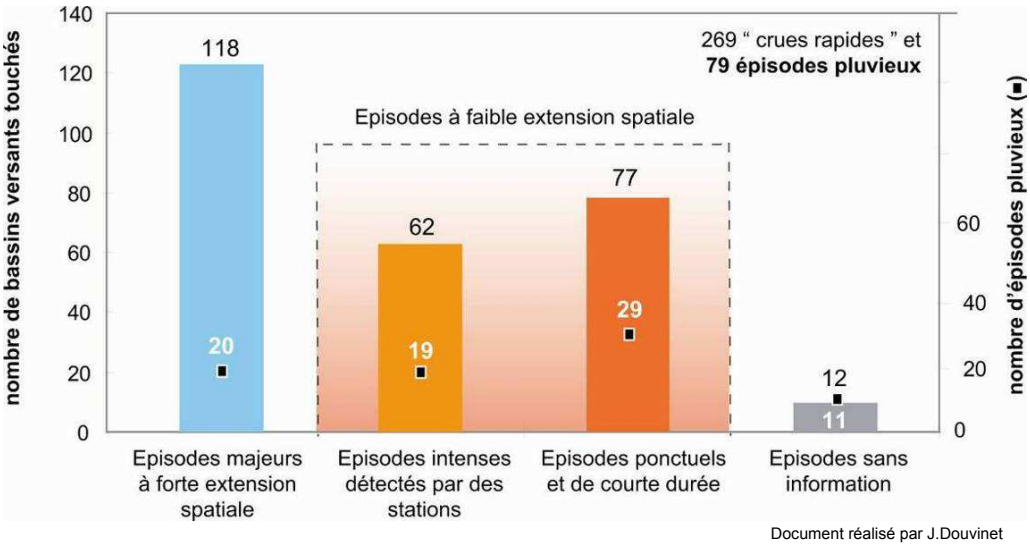


Fig. 4.4. Typologie des épisodes pluvieux suivant leur intensité et leur extension spatiale.

Date épisode	BV	Typ.	Valeurs de pluie relevées (réseau officiel Météo France + bénévoles) ou mentionnées dans les dossiers "CatNat"
06/06/1983	3		40mm dans l'Aisne, 72,3mm au Cap-de-la-Hève, 45mm en 3h
22/06/1983	2		60mm sur Cramont (80),
10/08/1983	3		100mm à Touffreville; 55,9mm en 45mn sur Bresles (60)
05/06/1985	2		50mm à Epegard dont 28mm en 30minutes; 75mm en 40mn sur Rouge-Perriers
26/07/1985	1		16,5mm en 15 minutes, 30,6mm en 1h à Brionne; 30mm en 30 minutes aux Andelys
20/05/1986	1		30,3mm en 2h à Villers-Faucon (80); 15mm en 15minutes après deux jours d'orages
17/06/1986	2		120mm à Clamecy, 108mm sur Bucy mesurés en 2h
20/06/1986	1		107mm mesuré en 7h sur le Grand-Priel (nord de St Quentin); 75mm à Pontru (record) à 5km au sud
07/05/1988	2		76mm à Monville et 60mm à St-Georges-Fontaine (76)
09/05/1988	1		99mm en deux jours dont 81,8mm en 1 journée mesuré à Betz
16/05/1988	3		sur Acy, 38mm en 1h30, 60mm sur Vierzy; 12,6mm à Evreux, contre 51,8mm sur Hectomare (27) en 1h30
25/05/1988	1		54mm en 30mn à Gauville-la-Campagne (27)
27/06/1990	1		55mm en 45minutes en amont de Jaulgonne
25/08/1990	1		52,8mm sur Crouy-en-Thelle en 45mn, dont 27mm en 15minutes
22/08/1991	1		24,6mm en 11minutes, voire 12,6mm en 3mn et 19,8mm en 6minutes
28/05/1992	1		83mm à Gouvieux, 117mm à Chaupontel (95); sur Pas-en-Artois (62), 15,4mm en 6minutes, et 28,2mm en 30minutes
03/06/1992	3		35mm en 30minutes sur la commune de Petite-Forêt; pas de données sur l'Aisne
09/06/1992	3		61mm à Pierrecourt en 1h; seulement 27mm à Cany-Barville; 30mm en 15mn sur Pontpoint (103mm à Beauvais en 5 jrs)
10/06/1992	1		36mm en 30mn dont 32mm en 15minutes sur Chézy (02)
20/08/1992	1		35,5mm sur Roubaix en 2H; 47,4mm en 1h10 sur Pecquencourt (59)
18/05/1993	5		103mm mesuré en 30minutes sur Sélens (pas de confirmation); sur St-Aubin, 105mm en 40minutes
09/06/1993	8		90mm en 6h sur Bourdainville; 150mm sur Trouville-Aliquerville (76)
01/07/1993	4		89,8mm mesuré en 3h26 sur Jaméricourt, dont 24mm en 15minutes
14/05/1994	9		42mm mesuré à Nampcel (60); 30,2mm à Dompierre-sur-Authie (80) en 30mn
15/05/1994	9		28mm en 30mn sur Le Boisle (62); 25mm en 1h sur Auxi-le-Château (80)
16/05/1994	2		35mm en 30mn à nouveau sur Le Boisle (62)
26/05/1994	2		44,5mm en 1h sur Ste-Geneviève-les-Gasny (27); 50mm en 20mn sur Barbery (60)
04/07/1994	1		30mm en 1h à Neufchatel-Hardelot
19/07/1994	1		55,2mm sur Brionne (27); 97,7mm sur Jumièges (76)
24/07/1994	1		52,4mm sur Rouen-Boos
11/07/1995	1		57,5mm sur Neuilly-sous-Thelle; 95mm à Nampcel; 130mm sur Caisnes
06/08/1995	5		59mm sur Godenvillers (60) dont 50mm en 45mn; 110mm sur Craonne; 80mm sur Marle; 97mm sur Grainville-en-Ry en 3h
23/08/1995	1		35,3mm sur Charly sur Marne ; 90mm sur Villiers-St-Denis en 1h30
18/05/1996	6		53mm sur Brasles, 49,8mm en 2h sur Coulonges-Cohan; 77mm sur Beuvardes en 2h; 110mm sur Parisy
14/05/1997	2		42mm en 5h relevé à Nampcel
11/06/1997	3		30mm en 15minutes à Fleurines (60); 40mm en 20mn d'après échos-radars sur Bourguignon-sous-Coucy
16/06/1997	18		144mm à Auzebosq (76); 80mm sur Villers-Ecalles (76) en 6h; 85mm à Goupillères (76); 70mm à Jumièges en 1h30
11/07/1997	5		100 à 130mm sur Château sur Epte; 75mm à Tilly (27); 32,3mm sur Venettes dont 15mm en 18minutes (60)
04/08/1997	8		103mm sur Lévemont (60) ; 62mm à Plessis-Benneville; 145mm à Montagny-en-Vexin; 96mm sur Bachivilliers (60)
05/08/1997	2		90,2mm sur Ardouval (76); 76mm à Morienne sur 16h glissantes
07/08/1997	2		86,1mm mesuré à Betz; 28,3mm à Plessis-Benneville en 15minutes; 50mm sur Monneaux; 75mm sur Aulnois (02)
12/08/1997	3		72mm à Pont-Audemer, 76mm à Tancarville (76); 102mm à Beuzeville; 123 à Fontaine
13/05/1998	7		67,1mm à Fécamp en 16h; 90mm en 10h sur Ganzeville
06/06/1998	20		39mm en 45mn à Pont-Audemer (27); 61,6mm sur Ardouval; 78,9mm à Auffay; 71,4mm à Vatteville (76)
07/05/1999	1		26mm à Dunkerque dont 23,8mm en 32mn (station DIREN)
30/05/1999	2		58mm sur St-Saulve; 60mm sur Estreux (59)
02/06/1999	3		51mm à Lyons la Foret (27), 22mm en 15mn
06/05/2000	6		130mm sur Montgobert, 75mm sur Nampteuil-sur-Muret; 40mm sur St-Marcel en 1h (27); 35mm en 20mn sur Connelles
07/05/2000	3		48mm sur Taillefontaine (02); 35mm en 30mn sur St-Bandry
08/05/2000	2		47,8mm mesuré en 96mn sur Dieppe (76)
09/05/2000	7		50mm en 6h à Yvetot (76); 70mm à Offrainville sur 6h
10/05/2000	4		75mm sur Duclair (76); 80mm sur Barentin en 1h30
11/05/2000	4		55,2mm sur Aulnois-sur-Laon (02); 50mm en 1h sur Oulchy-le-Château; 40mm sur Vaudancourt en 45mn (60)
03/06/2000	12		38mm en 20mn sur Villers-St-Frambourg (60); 38mm en 45mn à Trumilly (60) ; 50mm en 1h30 sur Aubin-St-Vaast (62)
07/07/2000	5		47mm à Brasles (02), 77mm sur Charly-sur-Marne en 12h; 47,2mm à Crézancy; 73mm sur Château-Thierry en 10h
09/07/2000	3		71,2mm à Crézancy (02); 87,2mm à Dammart sur 3 jours; 83mm sur Coincy (240mm sur 3 jours); 90mm à Etrépilly (02)
15/06/2001	3		49,8mm en 2h sur Hermeville
07/07/2001	13		91mm en 9h sur Eu (76); 196mm sur Rosières-en-Santerre en 12h; 170mm sur Maucourt; 76mm sur Taillefontaine
18/07/2001	1		74,2mm sur Brouay-en-Artois; 50mm sur Houdain en 3h
26/07/2001	5		40,8mm à Etrépagny en 40mn; 78mm sur Grivesnes en 7h (80)
02/08/2001	1		59,3mm sur Bolbec; 45mm sur Romain-de-Colbosc
07/08/2001	2		63,8mm à Embry; 34mm sur Attin
26/08/2002	3		70mm sur Allouagne ; 82,2mm sur Ourton; 52,1mm sur Givenchy-en-Gohelle (62): 52mm en 6h sur Mory
01/06/2003	4		137mm à Deauville (14); 82mm sur St Gatien-des-Bois dont 38mm en 1h; 63mm à Torteval-Quesnay
14/06/2003	1		70,4mm en 1h sur Englesqueville-la-Percée (14); 46,3mm sur Hermeville en 3h
29/08/2003	1		34mm en 15mn sur Monthiers
12/08/2004	1		40mm sur Epouville (76) en 3h
28/06/2005	3		50mm sur le Cap-de-la-Hève en 2h; 70mm sur Hautot-sur-Mer en 2h
04/07/2005	7		46,9mm sur Abbeville en 12h; 110,5mm à Marconnelle en 12h; 118mm à Fiefs; 91 à Lillers (62); 100mm à Crépy

Episodes majeurs à forte extension spatiale : pluies > 60 mm sur une ou plusieurs stations ;
Episodes localisés dont l'intensité est confirmée par les stations officielles et/ou bénévoles ;
Episodes ponctuels et de courte durée : intensités à rapporter sur des pas de temps courts.

Nota : Les 11 épisodes pour lesquels nous n'avons pas de données de pluie ne sont pas ajoutés dans ce tableau.

Tab. 4.1. Cumuls pluviométriques relevés pour les 68 épisodes pluvieux connus.

4.1.3. Premières conclusions et résultats attendus

Les « *crues rapides* » sont associées à deux types d'épisodes pluvieux dont les cumuls, les durées et l'extension spatiale sont très variables. Les épisodes majeurs à forte extension géographique correspondent probablement à ce que E. Muller (2006) désigne sous le terme EPS *(Episodes Précipitants Significatifs).* Même si la distribution du réseau de mesure est lâche, l'extension spatiale de l'épisode est suffisamment importante pour que celui-ci soit détecté par une ou plusieurs stations relativement éloignées entre elles. Les épisodes qui touchent des espaces plus restreints nécessitent par contre un réseau de mesures plus dense et à des échelles plus fines puisque la station ne va pas forcément se situer sous l'épicentre pluvieux.

On propose alors de **mieux appréhender les logiques spatiales et temporelles** des pluies de forte intensité en menant une **analyse à deux échelles** : à l'échelle régionale tout d'abord, en choisissant un réseau de stations sur l'ensemble de la zone d'étude ; à échelle large ensuite, en travaillant sur les situations atmosphériques et les types de circulations observées le jour j et les jours précédents la date de recensement des « *crues rapides* ».

4.2. Etude du seuil de déclenchement des phénomènes

4.2.1. Choix et limites des données

Dans un premier temps, le travail consiste à analyser les hauteurs de pluies quotidiennes sur un semis de stations choisies à partir du réseau officiel de Météo France. Le fait de choisir une couverture régionale a pour but de **privilégier une approche spatiale comparative** grâce à la disponibilité d'un grand nombre de postes pluviométriques pérennes, harmonieusement répartis et de bonne représentativité géographique.

L'intérêt de cette étude porte avant tout sur l'analyse temporelle des données ; sur le plan spatial, le choix des postes n'a pas toujours été facile, notamment sur les marges de la zone d'étude (Calvados, Nord, fig. 4.6.).

Un **premier tri** a permis de sélectionner 253 postes dont les données sont disponibles sur la période 1983-2005 (période similaire à l'inventaire « *crues rapides* »). Certaines stations ont été supprimées car plus de 30 % des données journalières manquaient. Au final, **85 stations** ont été retenues en s'adaptant au mieux à la forme, à la taille des départements et au relief. Le découpage par la méthode des polygones de Thiessen montre une distribution homogène entre les postes qui couvrent, en moyenne, une surface de 588 km² (fig. 4.5.).

La fiabilité des données a ensuite été vérifiée sur les 85 stations (Muller, 2006) :
- 51 stations (60 %) ne présentent aucune coupure dans leur série de données ;
- 65 stations ont plus de 99,5 % de données ;
- 79 stations (86 %) ont un nombre de données supérieur à 98 % (tab. 4.2.).

La station d'Auffay (fermée depuis le 31 décembre 2001), dont la série de données est la plus incomplète (83 %), a été gardée car, de manière paradoxale, c'est la plus représentative pour le département de la Seine-Maritime (Delahaye, 2002).

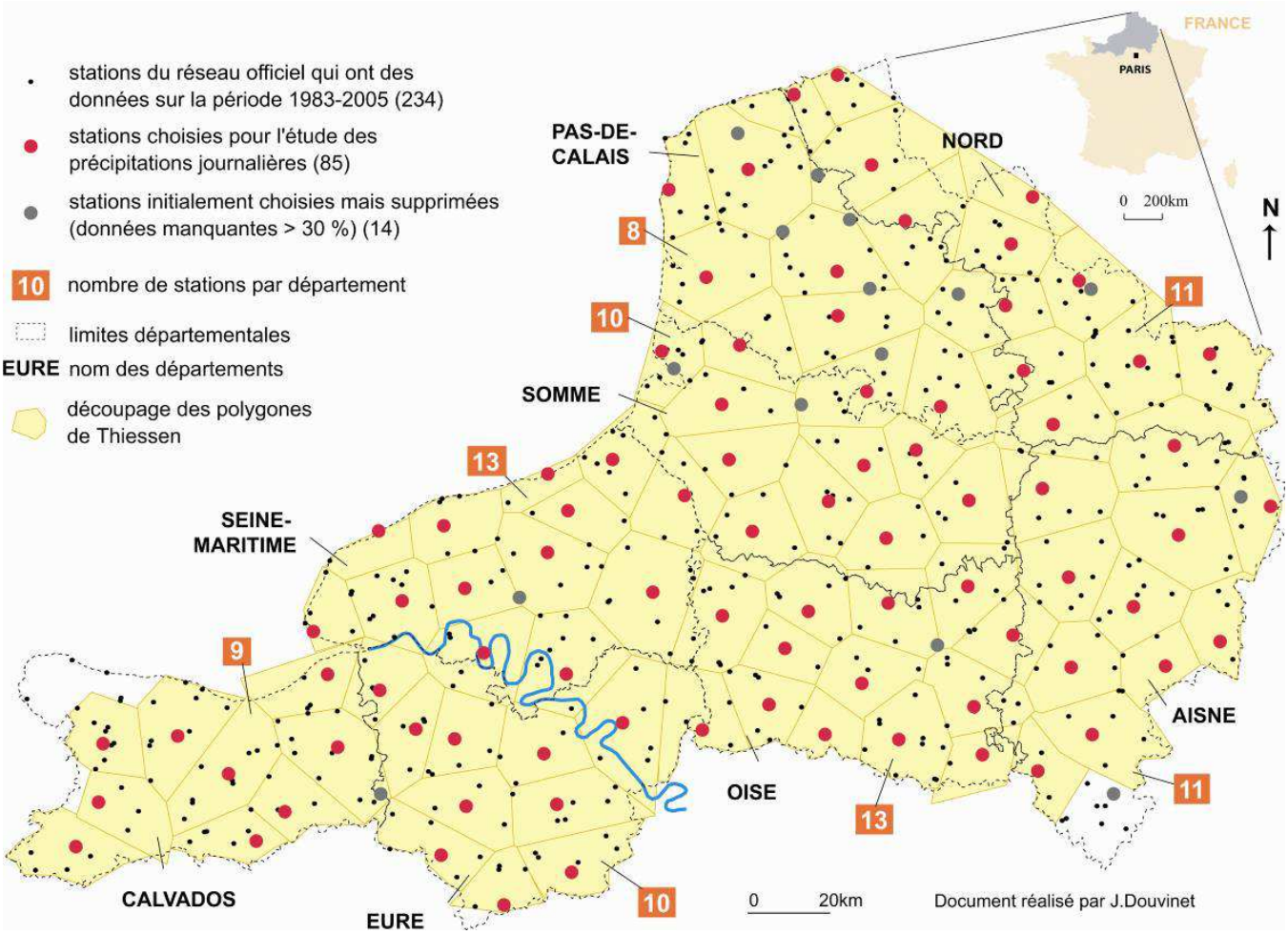


Fig. 4.5. Localisation et répartition géométrique des 85 stations initialement choisies.

	Stations (département)	% de fiabilité (1)	Stations (département)	% de fiabilité (1)	
AISNE	Aubenton (02)	99,92 %	Achiet-le-Grand (62)	99,65 %	PAS-DE-CALAIS
	Nouvion-en-Thiérarche (02)	99,40 %	Attin (62)	99,30 %	
	Prouvais (02)	98,60 %	Fiefs (62)	99,05 %	
	Soissons (02)	93,06 %	Licques (62)	96,16 %	
CALVADOS	Saint-Gatien-des-Bois (14)	99,04 %	Saint-Pol-Ternoise (62)	99,99 %	
	Saint-Sylvain (14)	99,67 %	Auffay (76)	83,34 %	SEINE-MARITIME
	Torteval-Quesnay (14)	98,61 %	Auzebosc (76)	99,66 %	
EURE	Marcilly-la-Campagne (27)	99,87 %	Bolbec (76)	98,60 %	
NORD	Cassel (59)	95,55 %	Cany-Barville (76)	99,65 %	
	Gravelines (59)	99,22 %	Forges-les-eaux (76)	99,65 %	
	Maubeuge (59)	99,84 %	Pierrecourt (76)	99,32 %	
	Merville (59)	93,97 %	Saint-Germain d'Etables (76)	98,85 %	
	Le Quesnoy (59)	97,43 %	Dompierre sur Authie (80)	99,38 %	SOMME
	Roubaix (59)	99,98 %	Hallencourt (80)	99,99 %	
	Lecelles (59)	99,65 %	Le Plessier-Rozenvilliers (80)	98,95 %	
OISE	Fresnoy-la-Rivière (60)	99,30 %	Poix-de-Picardie (80)	98,56 %	
			Saint-Gratien (80)	99,66 %	

1 = Part des jours de pluie où les données existent

Tab. 4.2. Pourcentage de données pour les 34 stations où les séries sont incomplètes.

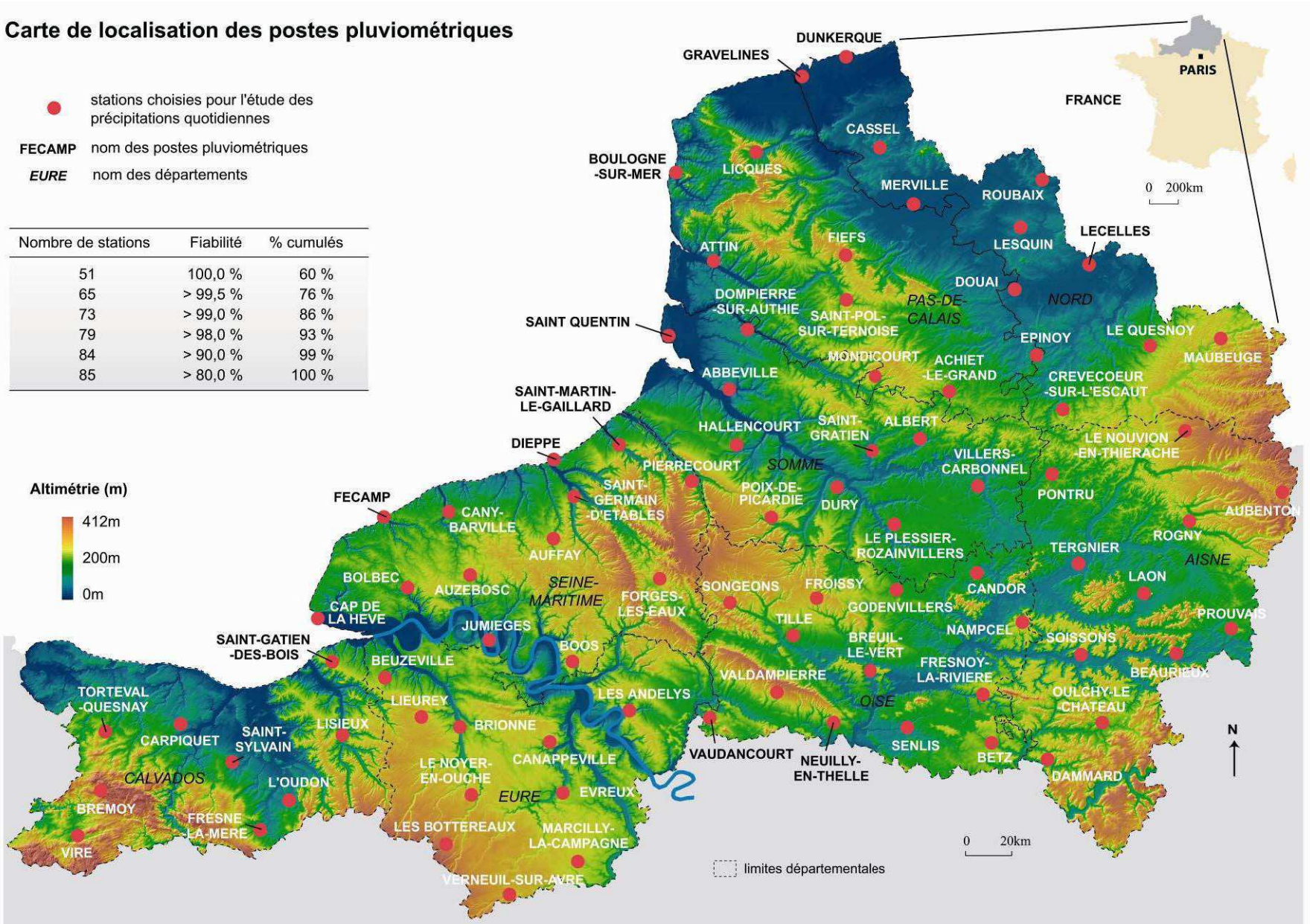


Fig. 4.6. Localisation et nom des postes pluviométriques retenus pour cette étude.

Document réalisé par J.Douvinet d'après la base Climathèque et les données Météo France (1983-2005)

L'utilisation des relevés quotidiens peut, en partie, être sujette à caution :

- l'hétérogénéité des pluies de forte intensité peut être très importante, même si on reste sur de courtes distances (Doswell *et al*., 1996 ; Douvinet *et al*., 2005a) ;

- lorsque toute la hauteur d'eau est bien captée par une station, elle ne renseigne pas sur l'intensité de l'épisode orageux, variable pourtant fondamentale pour tenter d'expliquer la cinématique de la crue (Lambert, 1996).

- le relevé journalier des pluviographes a toujours lieu à 6 H UTC (soit 8 H locales) et un tel découpage peut scinder un épisode pluvieux en deux (6-7 juillet 2001 ; 1er juin 2003) ;

- la période d'étude (1982-2005) est plus courte qu'une normale climatique définie sur 30 ans. Les maxima de certaines stations diffèrent par rapport à la *normale* définie par Météo France (1961-1990). Certains records ont également été dépassés en 2006 (Annexe 4.1.).

C'est en ayant connaissance de ces contraintes et limites d'utilisation que cette étude a été menée. Une comparaison des résultats obtenus sur les stations avec la base de données « *crues rapides* », sur une période identique (1983-2005), doit permettre de définir l'efficacité hydrologique des pluies de forte intensité, et de quantifier l'influence des facteurs indirects, notamment celle des antécédents hydroclimatiques dans la phase de « *préparation* » des crues.

4.2.2. Traitements et cartographie des maxima quotidiens (1983-2005)

Les **maxima de rang 1** correspondent aux valeurs extrêmes les plus importantes relevées sur les 85 stations entre mai et août inclus au cours de la période 1983-2005. **La carte met en avant plusieurs disparités et elle donne une première idée de l'organisation géographique des extrêmes** (fig. 4.7.). La valeur la plus faible (42 mm) a été mesurée à la station d'Oulchy-le-Château (02) ; la valeur la plus élevée (144 mm) a été relévée à Auzebosc (76) le 16 juin 1997. Les écarts sont parfois importants entre deux stations situées à proximité.

La répartition spatiale des maxima est assez similaire à la distribution moyenne annuelle des pluies. Le Pays d'Auge, le Pays de Caux, les collines du Haut-Pays d'Artois, le Pays de Thelle et le Soissonnais, régions annuellement les plus arrosées, ont des maxima plus élevés que le sud-est de la Seine-Maritime, l'intérieur de la Somme ou la partie centrale de l'Eure.

Un gradient spatial est observé : les maxima sont plus souvent recensés en juin à l'ouest de la zone d'étude (Calvados, Eure, Seine-Maritime) ; en juillet pour une partie centrale (Oise, Somme, Pas-de-Calais, Aisne) et de manière plus aléatoire pour août. Cette distribution est largement nuancée par plusieurs exceptions et la relation est loin d'être systématique. **Il faut aussi souligner que les maxima sont très peu recensés durant le mois de mai.**

Les **maxima de rang 2** (hauteur de pluie venant après les maxima de rang 1) ont aussi été recensés. Cela permet de s'affranchir des **effets des artefacts de mesure sur les rangs 1** qui sont révélateurs d'une situation exceptionnelle et qui n'identifient pas forcément les stations les plus fortement pluviogènes. La carte (fig. 4.8.) montre que les maxima sont plus fréquents en juin et juillet dans la partie ouest (Eure, Seine-Maritime) ; en juillet et août dans la partie orientale (Oise, Somme, Pas-de-Calais). On observe un certain **décalage vers l'est** par rapport à la première carte. Les maxima recensés en mai restent aléatoires et peu nombreux.

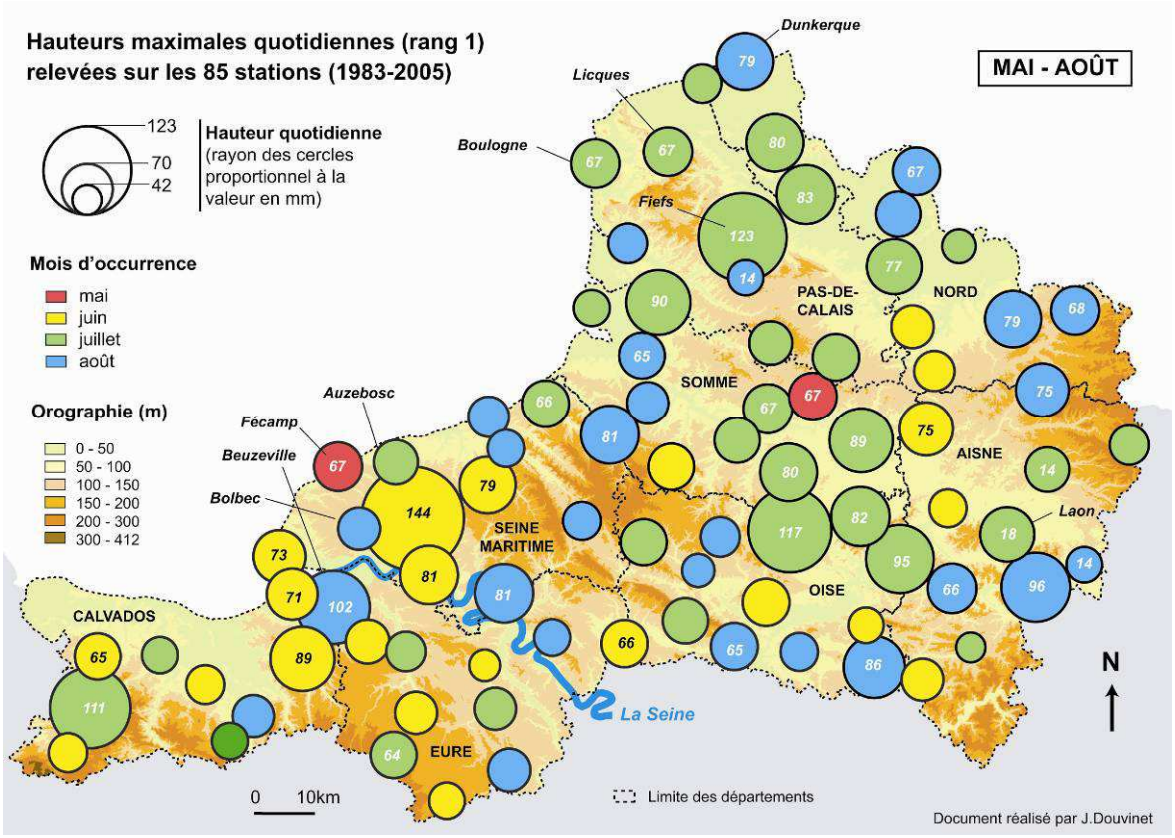


Fig. 4.7. Localisation et occurrence des **maxima de rang 1** sur les 85 stations (1983-2005).

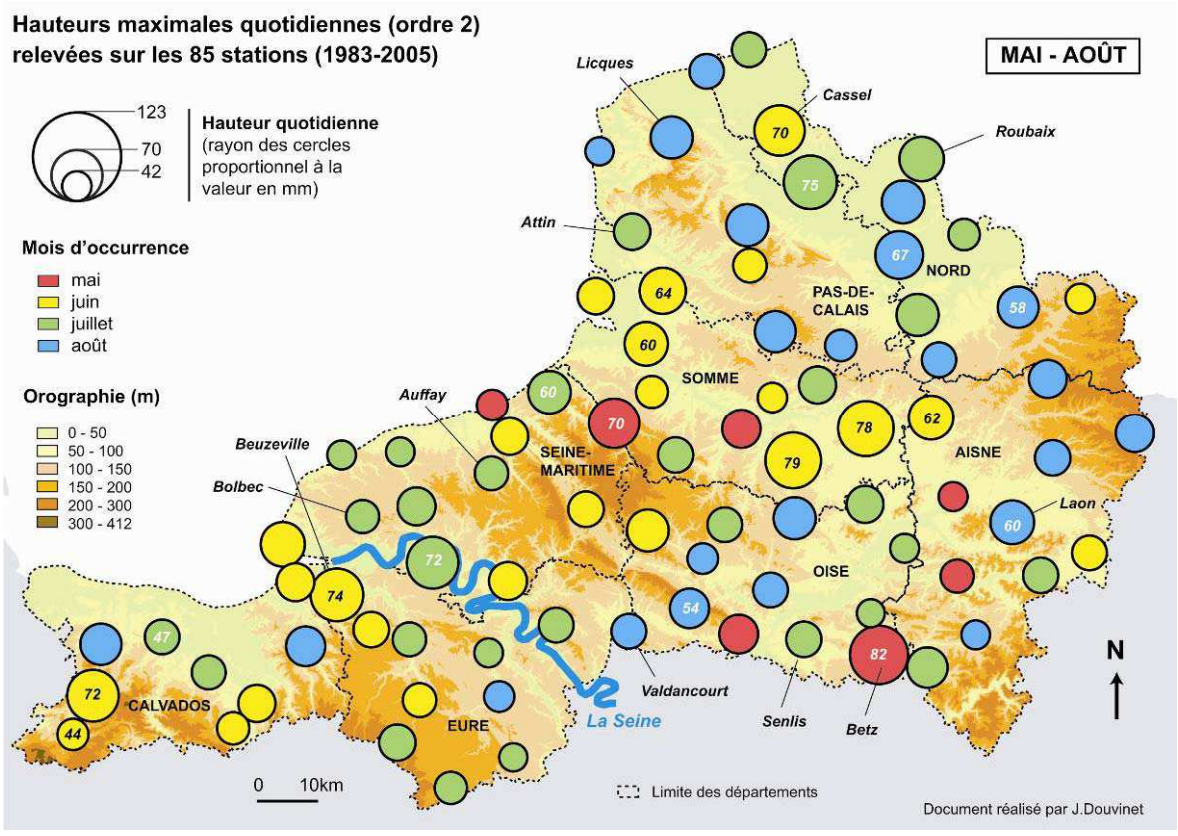


Fig. 4.8. Localisation et occurrence des **maxima de rang 2** sur les 85 stations (1983-2005)

	NUMERO	NOM	maxima 1	Date maxima 1	maxima 2	Date maxima 2
AISNE	02058001	BEAURIEUX	96,20	17/08/2003	50,00	23/07/1988
	02258001	DAMMARD	58,40	19/06/2002	56,80	07/07/2000
	02408002	LAON	75,30	23/07/1968	60,60	27/08/2002
	02558001	LE NOUVION-EN-THIERACHE	74,70	06/08/1995	53,40	29/08/1996
	02580001	OULCHY-LE-CHATEAU	42,00	23/07/2000	40,50	27/08/1997
	02614001	PONTRU	75,00	20/06/1986	62,50	20/06/1992
	02626001	PROUVAIS	50,00	17/08/2003	48,40	27/06/1990
	02652001	ROGNY	61,70	23/07/1988	49,50	06/08/1995
	02722002	SOISSONS	68,60	24/08/1987	54,00	28/05/1992
	02738001	TERGNIER	53,30	24/06/1983	40,50	13/08/2006
	02031001	AUBENTON	60,00	08/08/2002	53,60	10/08/1992
CALVADOS	14096001	BREMOY	111,00	10/07/1995	72,00	21/06/1986
	14137001	CAEN-CARPIQUET	48,60	04/07/2000	44,90	05/07/1989
	14289002	FRESNE-LA-MERE	51,00	18/07/1994	45,50	20/06/1992
	14366002	LISIEUX	89,20	16/06/1997	55,60	03/08/2000
	14578001	SAINT-GATIEN-DES-BOIS	71,80	01/06/2003	52,60	11/06/1993
	14624001	L'OUDON	58,60	02/08/1999	52,40	10/06/1993
	14659001	SAINT-SYLVAIN	54,70	20/06/1992	47,70	18/07/1994
	14695001	TORTEVAL-QUESNAY	65,00	01/06/2003	58,00	02/08/1999
	14762001	VIRE	53,00	11/06/1993	44,00	20/06/1992
EURE	27016001	LES ANDELYS	51,00	04/08/1997	49,00	10/07/1995
	27065001	BEUZEVILLE	102,40	12/08/1997	74,00	01/06/2003
	27096001	LES BOTTEREAUX	64,50	18/07/1994	51,00	18/07/2001
	27116001	BRIONNE	55,20	18/07/1994	47,00	26/07/1985
	27127001	CANAPPEVILLE	44,20	20/06/1992	39,90	26/07/1985
	27229003	EVREUX	59,00	19/07/1964	42,80	07/06/1987
	27367001	LIEUREY	61,20	20/06/1992	50,00	12/08/1997
	27390001	MARCILLY-LA-CAMPAGNE	60,10	07/08/1994	39,60	23/07/2000
	27444001	LE NOYER-EN-OUCHE	58,50	16/06/1997	47,80	20/06/1992
	27679001	VERNEUIL-SUR-AVRE	50,90	30/06/1988	45,00	23/07/2000
NORD	59135002	CASSEL	80,00	30/07/1964	70,00	24/06/2005
	59161001	CREVECOEUR-SUR-L'ESCAUT	56,00	20/06/1992	48,00	29/08/2006
	59178001	DOUAI	77,10	03/07/2005	67,00	25/08/1990
	59183001	DUNKERQUE	79,10	29/08/1996	48,00	13/07/1995
	59273002	GRAVELINES	54,30	13/07/1995	41,40	29/08/1996
	59343001	LESQUIN	62,80	19/08/2005	59,40	03/07/2005
	59392001	MAUBEUGE	68,20	29/08/1996	42,30	02/06/1992
	59400002	MERVILLE	83,00	03/07/2005	75,00	10/07/1995
	59481001	LE QUESNOY	79,00	29/08/1996	58,20	31/08/1986
	59512001	ROUBAIX	67,00	29/08/1996	62,00	17/07/1987
	59526005	LECELLES	47,00	17/07/1987	44,20	03/07/2005
OISE	60069001	BETZ	86,10	07/08/1997	82,00	08/05/1988
OISE	60107001	BREUIL-LE-VERT	65,20	26/06/1983	48,00	24/08/1987
	60124001	CANDOR	82,60	06/07/2001	49,20	24/07/2000
	60260001	FRESNOY-LA-RIVIERE	50,00	17/06/1986	36,70	23/07/1988
	60276001	GODENVILLERS	117,00	06/07/2001	59,00	06/08/1995
	60445001	NAMPCEL	95,00	11/07/1995	46,00	06/07/2001
	60450001	NEUILLY-EN-THELLE	66,00	24/08/1987	54,50	28/05/1992
	60612001	SENLIS	53,00	24/08/1987	50,00	06/07/2001
	60623001	SONGEONS	64,20	25/07/2001	58,50	20/06/1992
	60639001	TILLE	46,80	24/08/1987	42,60	15/08/1990
	60652001	VALDAMPIERRE	63,80	06/07/2001	55,00	24/08/1987
	60659001	VAUDANCOURT	66,00	24/06/2005	48,20	24/08/1987
	60265001	FROISSY	55,30	24/08/1987	48,20	06/07/2001
PAS-DE-CALAIS	62005001	ACHIET-LE-GRAND	65,80	03/07/2005	44,50	24/08/1987
	62044001	ATTIN	55,20	29/08/1996	50,50	16/07/2003
	62160001	BOULOGNE-SUR-MER	67,60	18/08/1999	39,00	29/08/1996
	62298001	EPINOY	59,60	07/06/1987	59,00	11/07/1995
	62767001	SAINT-POL-SUR-TERNOISE	49,20	29/08/1996	43,00	03/06/2000
	62506001	LICQUES	111,50	12/08/2006	67,50	17/07/1987
	62333001	FIEFS	123,00	03/07/2005	59,00	29/08/1996
	62583001	MONDICOURT	61,10	07/07/2001	58,10	06/08/1995
SEINE-MARITIME	76034001	AUFFAY	78,80	06/06/1998	49,30	24/07/1994
	76043001	AUZEBOSC	144,00	16/06/1997	52,30	04/07/2000
	76114001	BOLBEC	59,30	02/08/2001	46,20	19/07/1987
	76116001	ROUEN-BOOS	81,30	10/08/1983	53,40	20/06/1992
	76159001	CANY-BARVILLE	62,40	04/07/2000	51,00	18/07/1994
	76217001	DIEPPE	51,20	25/08/1987	47,30	07/05/2000
	76259001	FECAMP	67,10	13/05/1998	40,80	04/07/2000
	76276001	FORGES-LES-EAUX	53,50	05/08/1987	49,30	20/06/1992
	76351001	LE HAVRE-CAP DE LA HEVE	73,30	05/06/1983	62,20	01/06/2003
	76378001	JUMIEGES	81,00	16/06/1997	72,00	18/07/1994
	76500001	PIERRECOURT	81,00	07/08/1992	70,00	28/05/1992
	76582001	SAINT-GERMAIN-D'ETABLES	51,80	25/08/1987	51,60	05/06/1998
	76619001	SAINT-MARTIN-LE-GAILLARD	66,00	07/07/2001	59,50	27/07/1994
SOMME	80001001	ABBEVILLE	65,00	26/08/2002	61,00	05/06/2002
	80016001	ALBERT	67,00	28/05/1992	52,50	03/07/2005
	80248001	DOMPIERRE-SUR-AUTHIE	90,40	03/07/2005	64,20	22/06/1983
	80261001	DURY	63,40	03/07/2005	54,20	20/06/1992
	80406001	HALLENCOURT	58,60	24/08/1987	44,60	09/06/1993
	80628001	LE PLESSIER-ROZAINVILLERS	80,00	06/07/2001	78,50	20/06/1992
	80630001	POIX-DE-PICARDIE	64,30	20/06/1992	49,80	24/08/1987
	80801001	VILLERS-CARBONNEL	89,20	06/07/1999	78,00	20/06/1992
	80704001	SAINT GRATIEN	69,00	03/07/2005	45,10	14/05/1985
	80713001	SAINT-QUENTIN-EN-TOURMONT	51,10	27/07/2005	50,90	05/06/1992

Document réalisé par J.Douvinet à partir de la base Climathèque et les données Météo France (1983-2005)

Tab. 4.3. Maxima de rangs 1 et 2 relevés entre mai et août inclus (1983-2005).

Une étude comparative a été menée entre les maxima des rangs 1 et 2 (tab. 4.3.) afin de voir s'il existe une relation entre les deux. Si la corrélation est prouvée, les maxima de rang 1 peuvent être considérés comme fiables et révéler la sensibilité des stations aux pluies de forte intensité. Les résultats paraissent finalement contrastés (fig. 4.9.) :

- sur certains postes pluviométriques, la relation est vérifiée**.** Les maxima étant élevés, on peut considérer que ces **stations** (au nombre de 14) sont **fortement pluviogènes** (Betz, Le Plessier-Rozainvilliers, Villers-Carbonnel…) ;

- sur d'autres stations (16 postes), les maxima de rang 2 sont très nettement inférieurs aux maxima de rang 1. On peut citer l'exemple de la station d'Auzebosc (76), dont le maxima passe de 144 mm à 52,3 mm[2] ou la station de Nampcel (60) dont la valeur passe de 95 mm à 46 mm (tab. 4.3.). **Le rang 1 identifie alors un épisode intense mais qui ne traduit pas une situation pluviogène.**

- les autres stations (55 postes, soit 65 % de l'échantillon) se répartissent entre ces deux situations opposées. Elles qualifient des **épisodes pluvieux homogènes** (40 - 70 mm) avec des écarts qui varient entre 0 et 20 mm (fig. 4.9.).

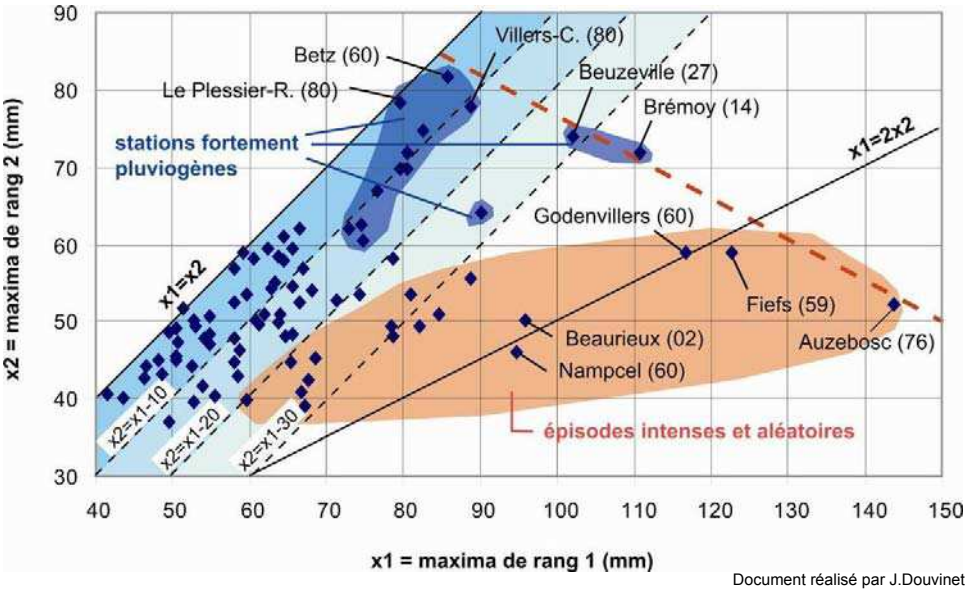


Fig. 4.9. Comparaison entre les maxima de rangs 1 et 2 relevés sur les 85 stations (1983-2005).

La relation entre les maxima des rangs 2 et 3 a aussi été analysée (Annexe 4.2.). Les écarts se réduisent et on observe une **meilleure homogénéité** entre les valeurs extrêmes. La plupart des stations pluviogènes garde des valeurs élevées, sauf Betz (60) et Villers-Carbonnel (80), qui ont des maxima de rang 3 (< 50 mm) qui chutent par rapport à ceux des rangs 2.

Cette étude permet finalement d'opposer des stations qui ont des maxima de rangs 1 et 2 relativement proches, aux autres stations dont les maxima de rang 1 correspondent à des épisodes exceptionnels et aléatoires. Certaines stations sont particulièrement pluviogènes, avec des maxima de rangs 1 et 2 qui restent élevés (supérieures à 60 mm).

[2] Des doutes sont émis sur la validité de ce rang 1 (144 mm). En effet, des crues sont apparues le même jour (16 juin 1997) et à proximité de la station d'Auzebosc ; néanmoins, les relevés indiquent des cumuls de 60 à 80 mm tombés en 6 h et il n'a jamais été fait mention d'une telle valeur, à la fois dans les dossiers *« CatNat »* et dans le rapport météorologique. La valeur indiquée serait probablement liée à une erreur de frappe dans la base de données. Cette hypothèse reste à vérifier.

4.2.3. Liens entre les maxima et les épisodes « *crues rapides* »

Les dates des maxima quotidiens ont été confrontées aux épisodes « *crues rapides* » (1983-2005) afin de mesurer la part des catastrophes avérées détectées par les 85 stations.

25% des épisodes « *crues rapides* » correspondent à des maxima de rang 1. Le pourcentage d'épisodes identifiés augmente progressivement en intégrant les dates des maxima de rang 2 (41 %) et de rang 3 (47 %). Au final, après avoir supprimé les doublons, ce sont **37 épisodes** « *crues rapides* » qui sont associés à des maxima relevés par une des 85 stations (Tab. 4.4.). **Ce résultat signifie que près de la moitié des crues est liée à des abats d'eau remarquables qui sont détectés par ce semis de stations relativement bien distribuées à l'échelle régionale.**

Les maxima ont ensuite été répartis entre les deux types d'épisodes pluvieux initialement distingués (fig. 4.4.). **Les épisodes majeurs à forte étendue spatiale sont les plus facilement détectés** (15 épisodes sur 20), en particulier par les maxima de rang 1 (65 %).

Les épisodes affectant des espaces restreints sont moins faciles à détecter. Les résultats sont toutefois différents entre les deux sous-types : étant donné la distribution du réseau qui est somme toute assez lâche, les épisodes ponctuels et de courte durée sont relativement bien identifiés (14 épisodes sur 29), notamment par les maxima de rang 2. A l'inverse, les épisodes intenses, indiqués par d'autres stations, sont faiblement reconnus (6 épisodes sur 19).

MAXIMA	20 épisodes à forte extension spatiale	48 épisodes à extension spatiale réduite		11 épisodes dont les pluies sont inconnues	Pourcentage d'épisodes détectés
		détectés par le réseau officiel de Météo France	mesurés par les radars et les stations bénévoles		
rang 1	**13**	2	4	1	20 (25 %)
rang 2	8	3	**7**	2	20 (25 %)
rang 3	7	2	5	1	15 (19 %)
rangs 1 + 2	15 *	5	10	2	32 (41 %)
total (%)	**15 (75 %)**	**6 (32 %)**	**14 (48 %)**	**2 (18 %)**	**37 (47 %)**

* total après extraction des doublons (des dates sont en effet communes aux rangs 1, 2 et 3 sur plusieurs stations)

Tab. 4.4. Episodes « *crues rapides* » communs aux différents maxima relevés sur les 85 stations.

Les écarts entre les maxima et les épisodes de « *crues rapides* » peuvent s'expliquer par la distribution du réseau et par l'éloignement des stations par rapport aux épicentres les plus pluviogènes. **On remarque surtout une « *surreprésentation* » des épisodes à forte extension spatiale.** Lorsque deux stations suffisamment éloignées enregistrent leur maxima à la même date, on peut considérer que cet épisode correspond à un Evénement Précipitant Significatif, ou **EPS** (Anquetin *et al.*, 2003 ; Muller, 2006). En analysant les dates des maxima, on observe que 59 % des maxima de rang 1, 52 % des maxima de rang 2, et 45 % des maxima de rang 3, identifient des EPS. **Bon nombre de maxima sont finalement associés à des épisodes à forte étendue spatiale. Ces systèmes de plus grande ampleur ont sans doute pour conséquence de masquer des épisodes un peu moins intenses et probablement plus localisés.**

A la lecture de ces résultats, on propose de mener une seconde étude, dite *« par seuil »*, afin de répondre à la question suivante : **la part des épisodes à l'origine des « *crues rapides* » recensées augmente-t-elle si on diminue la valeur des intensités pluviométriques relevées sur les 85 stations ?**

4.2.4. Distribution des pluies supérieures à des seuils donnés

Le nombre de jours où des pluies mesurées par le réseau de 85 stations (1983-2005) sont supérieures à un seuil donné, a été comptabilisé suivant la méthode d'échantillonnage dite « *sup-seuil* » (Wotling, 1998). Les seuils retenus ont été fixés à 30 et 40 mm afin de prendre en compte l'éloignement des stations par rapport à des zones pluviogènes, et voir quelle est la représentativité de ces deux seuils par rapport aux épisodes « *crues rapides* » recensés.

Les jours où des pluies supérieures à 30 mm ont été détectées, ont été cumulés sur les 85 stations entre mai et août inclus et durant la période 1983-2005 (fig. 4.10.). Certains secteurs géographiques sont plus sensibles, en particulier le Pays de Caux, le Pays d'Auge, la vallée de la Seine, le Nord, l'est de l'Aisne et les collines de l'Artois. D'autres secteurs semblent, à l'inverse, moins pluviogènes : le sud de l'Eure, la partie nord-ouest de l'Oise et le Santerre.

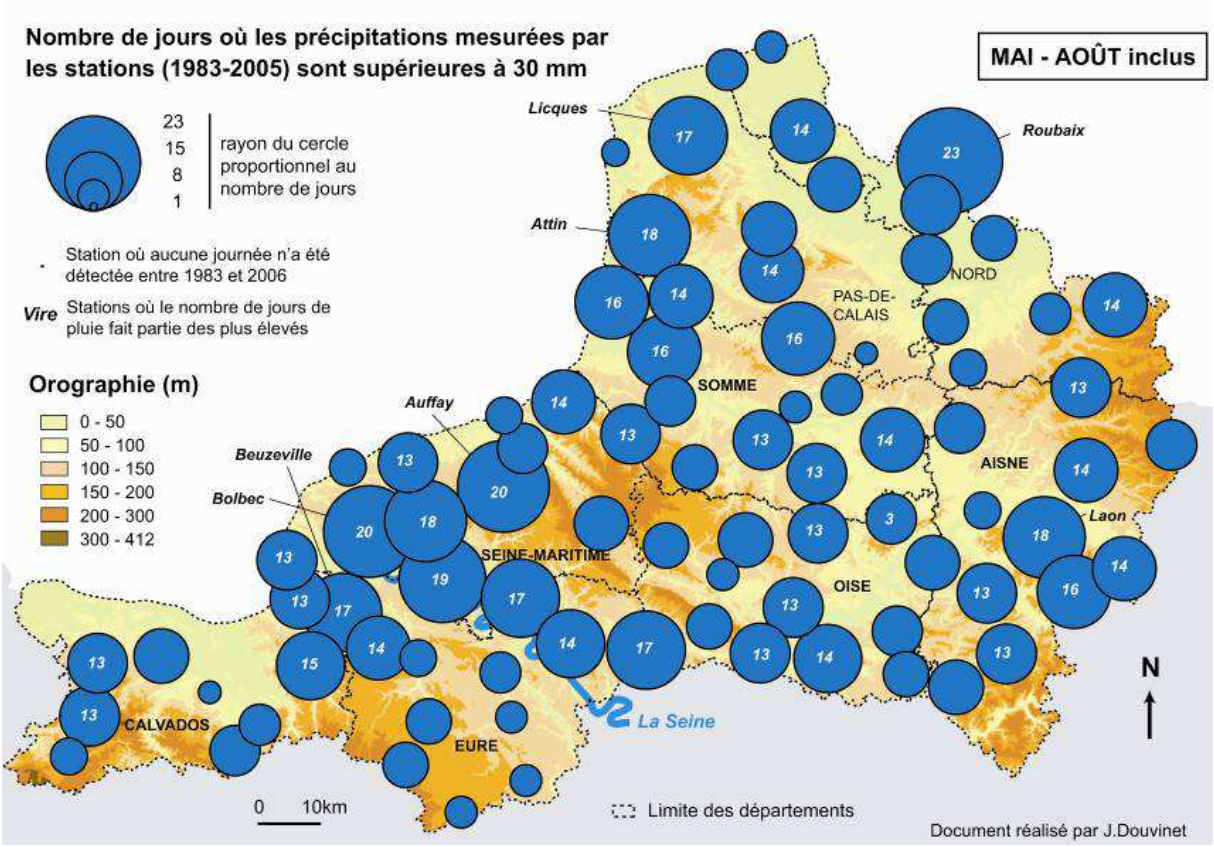
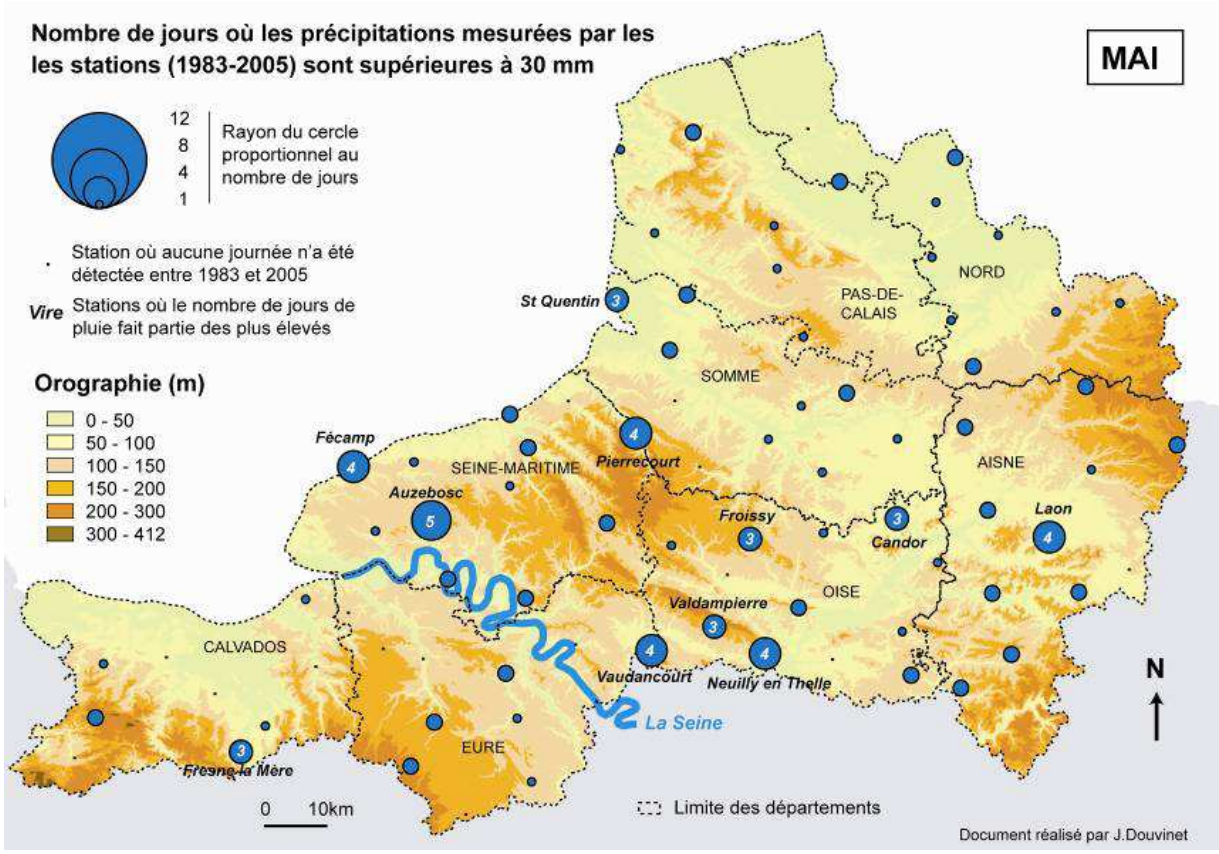


Fig. 4.10. Nombre de jours où des pluies supérieures à 30 mm ont été mesurées.

A l'échelle mensuelle (fig. 4.11.), des différences importantes s'observent :
- **mai :** le nombre de jours de pluies (> à 30 mm) est très faible sur l'ensemble de la zone ;
- **juin :** la plupart des stations mesurent des pluies supérieures à 30 mm ; c'est la partie occidentale qui apparaît la plus sensible (Pays d'Auge, Pays de Caux) ;
- **juillet :** on remarque un certain décalage vers l'est ; les disparités se renforcent entre les secteurs où le nombre de jours de pluie est important (Pays de Caux, Artois, vallée de la Seine, vallée de l'Oise et vallée de la Marne) et le reste de la zone d'étude ;
- **août** : le nombre de jours de pluie devient élevé sur bon nombre de stations ; la marge septentrionale, et secondairement la partie orientale, sont les plus sensibles.



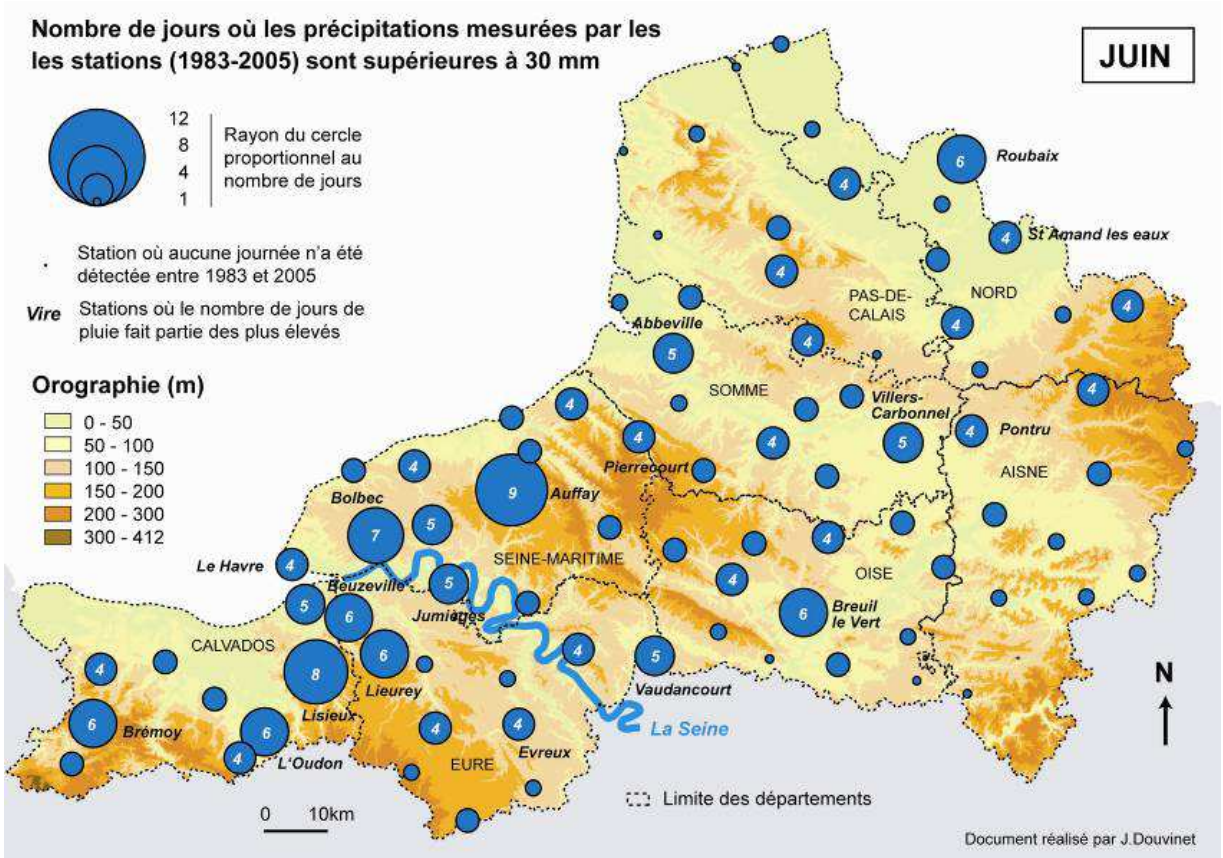


Fig. 4.11/A. Nombre de jours où les précipitations mesurées par les 85 stations (1983-2005) sont supérieures à 30 mm pour les mois de mai et juin.

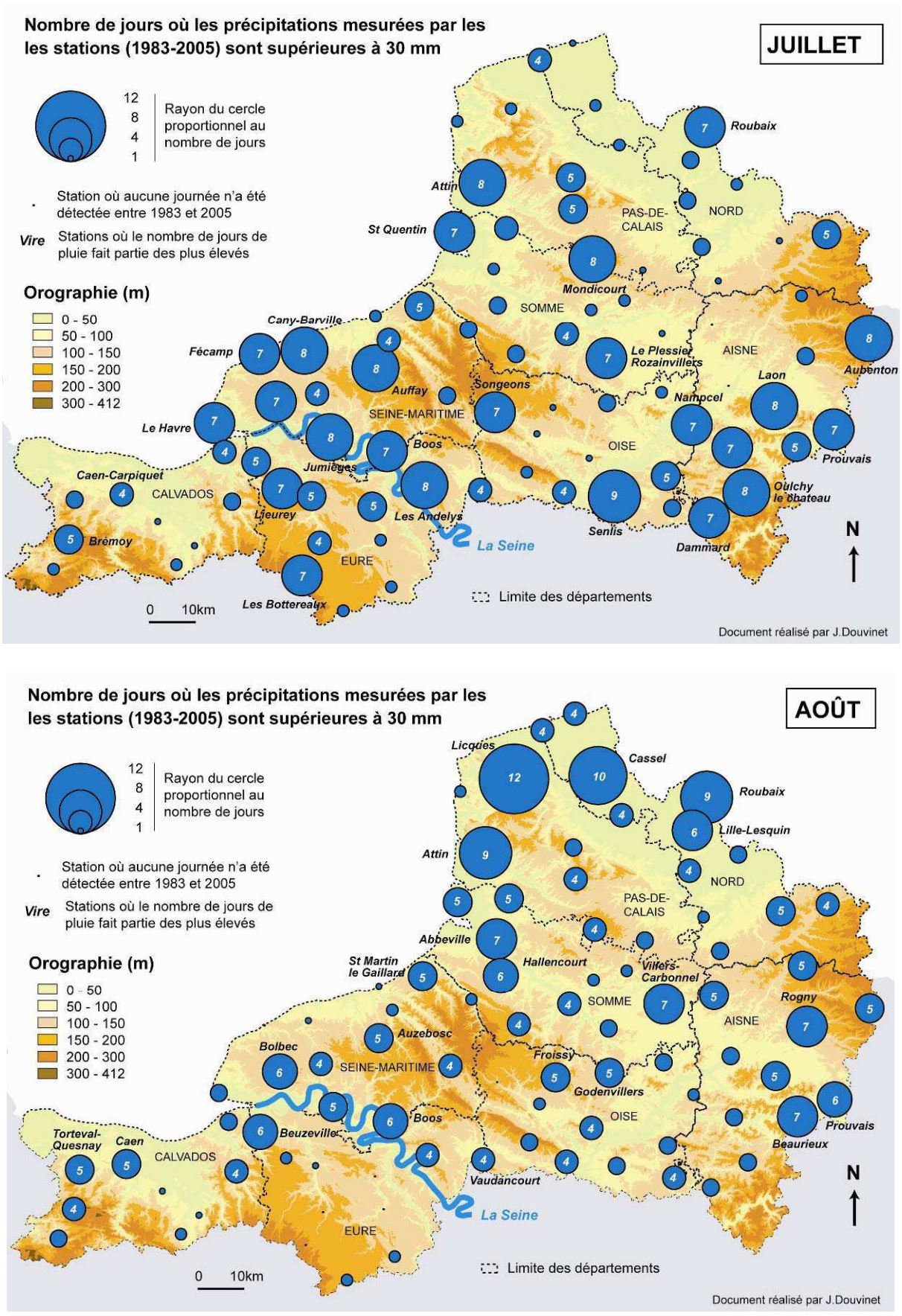


Fig. 4.11/B. Nombre de jours où les précipitations mesurées par les 85 stations (1983-2005) sont supérieures à 30 mm pour les mois de juillet et août.

Les jours où les précipitations sont supérieures à 30 mm sont **rarement** observés au cours du mois de **mai**. Par contre, on observe, **entre juin et août, un gradient spatial d'ouest en est,** qui avait été pressenti en analysant la distribution des maxima. Les jours où les pluies sont supérieures à 30 mm deviennent nombreux à partir de juin. Cette observation matérialise le début de l'*« été »*, d'un point de vue climatique, avec l'arrivée par l'ouest des masses d'air instables, favorables aux averses et aux orages. Un décalage s'opère progressivement vers la partie orientale en juillet (Pas-de-Calais, Aisne), et vers le nord et l'est de manière privilégiée en août (Nord, Aisne). **Ce gradient spatial n'est pas exclusif** : des passages orageux peuvent aussi être détectés par les stations sur la totalité de la période étudiée.

Le nombre de jours où les pluies sont supérieures à 40 mm a également été totalisé sur chaque station (fig. 4.12.). Le passage au seuil 40 mm a pour effet d'**accentuer les disparités** entre les stations et il met en opposition les stations où le nombre de jours de pluies > 40 mm est corrélé à celui mesuré à 30 mm (Cassel, Villers-Carbonnel, Le Plessier-Rozainvilliers) et, à l'inverse, les stations où le nombre de jours de pluies est très faible (Senlis, Auffay, Fresnoy-la-Rivière, Hallencourt, Oulchy-le-Château, fig. 4.6.).

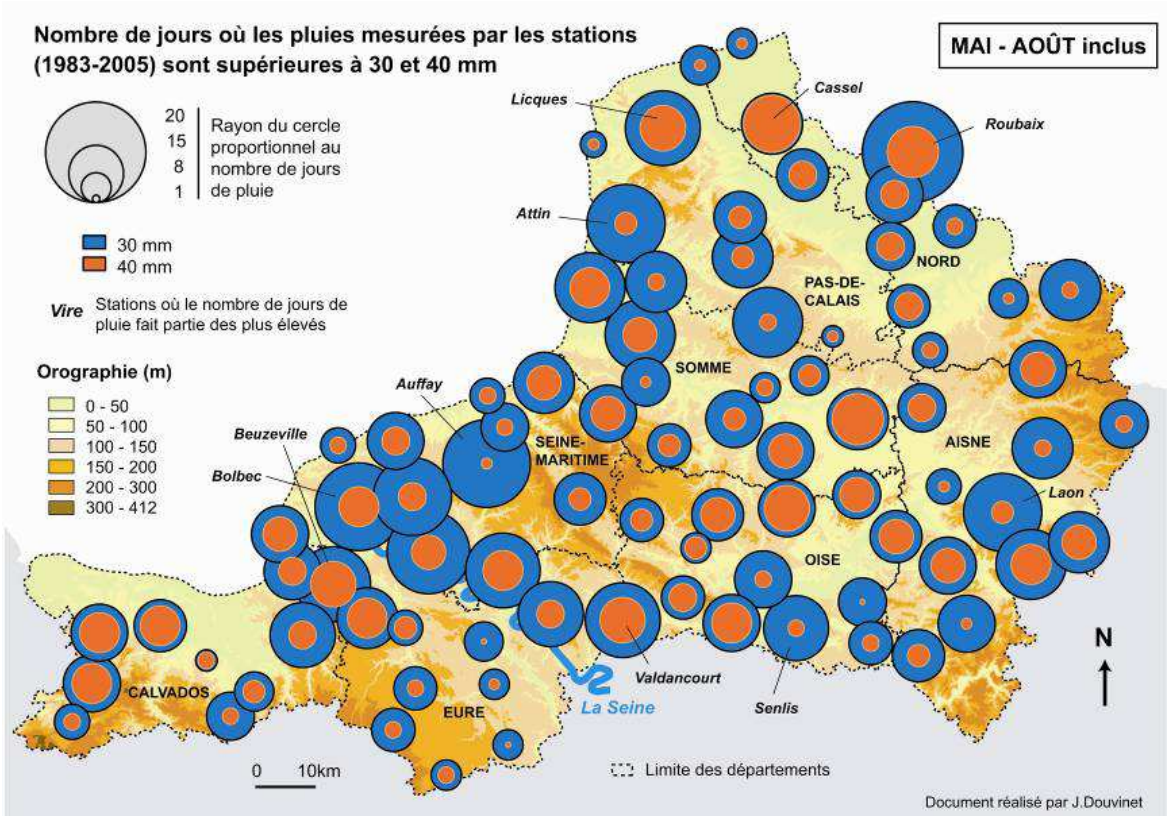


Fig. 4.12. Nombre de jours où des pluies supérieures à 30 et à 40 mm ont été mesurées.

Les cartes réalisées à l'échelle mensuelle montrent de nouveau **le faible nombre de jours où des pluies supérieures à 40 mm ont été mesurées au mois de mai, et elles confirment l'existence d'un gradient spatial d'ouest en est et de juin à août** (Annexe 4.3). Des stations s'individualisent par un nombre de jours élevé en fonction des mois étudiés : 3 jours détectés à Neuilly en Thelle (60) en mai ; 5 jours où la pluie est supérieure à 40 mm à Cany-Barville (76) en juillet ; 5 et 7 jours mesurés à Licques (62) et Cassel (59) en août. Ces résultats peuvent désormais être confrontés avec les épisodes *« crues rapides »* pour savoir si cette méthode dite *« par seuil »* améliore bel et bien la part des catastrophes détectées.

4.2.5. Liens entre l'étude « *par seuil* » et les épisodes « *crues rapides* »

En abaissant progressivement les seuils, on retrouve la quasi totalité des épisodes « *crues rapides* » (fig. 4.13.) : **32 épisodes (soit 40 %)** sont détectés lorsqu'on fixe le seuil à 50 mm sur les 85 stations ; 57 % au dessus de 40 mm ; 78 % à 30 mm ; 91 % à 20 mm et 96 % à 10 mm. 14 épisodes majeurs à forte extension spatiale sont identifiés au dessus du seuil de 50 mm. Ces 14 épisodes correspondent à ceux déjà identifiés par l'étude des maxima des rangs 1 et 2.

Des différences importantes sont observées à l'échelle mensuelle. Les épisodes qui ont eu lieu en mai sont très faiblement identifiés au-dessus du seuil 50 mm : 3 sur 23, soit 13 %. Il faut descendre à 30 mm pour obtenir une meilleure représentativité du réseau et détecter 70 % des épisodes, puis à 10 mm pour englober les 23 dates de « *crues rapides* ». Les épisodes qui ont eu lieu en juillet (63 %), en août (56 %) et en juin (43 %) sont plus facilement détectés par le seuil fixé à 50 mm. On atteint des pourcentages importants pour le seuil 30 mm avec 89 % des épisodes identifiés en juin, 87 % en août et 82 % en juillet (fig. 4.13.). **Le seuil 30 mm est suffisamment représentatif pour pouvoir être considéré comme une « *averse extrême caractéristique* », ou ERT** (« *extreme rainfall threshold* »), pour laquelle une « *crue rapide* » peut potentiellement apparaître (notion proposée par J.-M. Cador, communication orale).

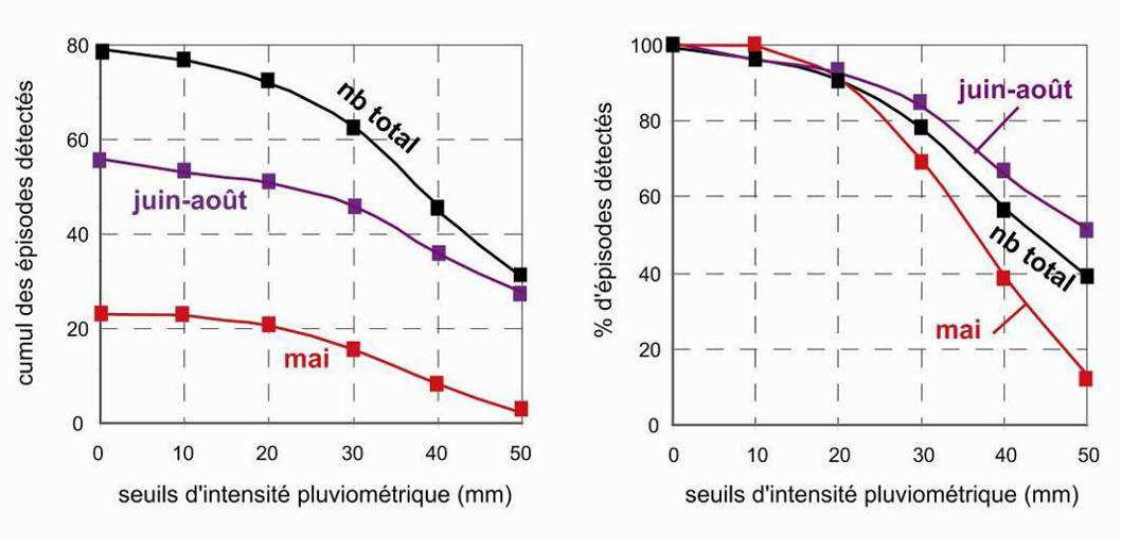


Fig. 4.13. Part des épisodes détectés en fonction des seuils d'intensité choisis sur les 85 stations.

Le nombre de jours où une pluie supérieure à 50 mm a été enregistrée sur une des 85 stations, a été comptabilisé (tab. 4.5.). **Sur les 72 épisodes identifiés, 32 épisodes sont liés à des « *crues rapides* »**, ce qui représente 40 % de l'échantillon. Autrement dit, 60 % des pluies supérieures à 50 mm ne sont pas associés à ce type d'événement. **Les pluies supérieures à 50 mm sont donc nécessaires mais pas suffisantes pour expliquer l'apparition des « *crues rapides* ».** De telles intensités sont rarement mesurées au mois de mai, ce qui sous entend que les épisodes seraient associés à des pluies plus faibles.

Le nombre de jours où une pluie supérieure à 30 mm a été mesurée, a aussi été totalisé. Sur les 285 jours identifiés, 62 épisodes (22 %) sont directement associés à des « *crues rapides* » déclarées. 78 % des pluies > 30 mm ne sont pas associées à ce type de phénomène. L'intensité de la pluie n'est donc pas la seule variable pouvant expliquer la genèse des « *crues rapides* ». La part des pluies sans « *crues rapides* » augmente, passant de **60 % à 50 mm à 78 % à 30 mm.**

MOIS	A 69 épisodes “crues rapides”	B nb jours de pluies > 50 mm (stations)	C (C/A) épisodes > 50 mm avec crues rapides	D = A - C (A/C) pluies < 50mm avec crues rapides	E = B - C (B/C) pluies > 50mm sans crues rapides
mai	23	4	3 (13 %)	20 (87 %)	1 (25 %)
juin	24	20	10 (42 %)	14 (58 %)	10 (50 %)
juillet	16	23	10 (63 %)	6 (37 %)	13 (56 %)
août	16	25	9 (56 %)	7 (44 %)	16 (64 %)
total	**79**	**72**	**32 (40 %)**	**47 (60 %)**	**40 (60 %)**

Tab. 4.5. Episodes « *crues rapides* » ou « *sans crues rapides* » détectés pour le seuil 50 mm.

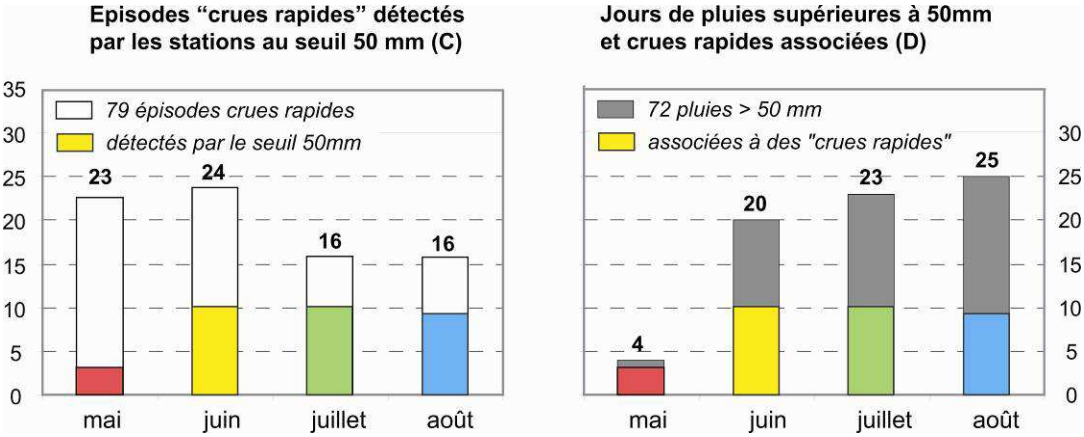


Fig. 4.14. Episodes de pluies > 50mm et relation avec les « *crues rapides* » (1983-2005).

MOIS	A Nb épisodes “crues rapides”	B Nb jours de pluies > 30 mm (stations)	C (C/A) épisodes > 30 mm avec crues rapides	D = A - C (A/C) pluies < 30mm avec crues rapides	E = B - C (B/C) pluies > 30mm sans crues rapides
mai	23	54	15 (65 %)	8 (35 %)	39 (72 %)
juin	24	64	20 (83 %)	4 (17 %)	44 (68 %)
juillet	16	82	13 (81 %)	3 (19 %)	69 (84 %)
août	16	85	14 (87 %)	2 (13 %)	71 (84 %)
total	**79**	**285**	**62 (78 %)**	**17 (22 %)**	**223 (78 %)**

Tab. 4.6. Episodes « *crues rapides* » ou « *sans crues rapides* » détectés pour le seuil de 30 mm.

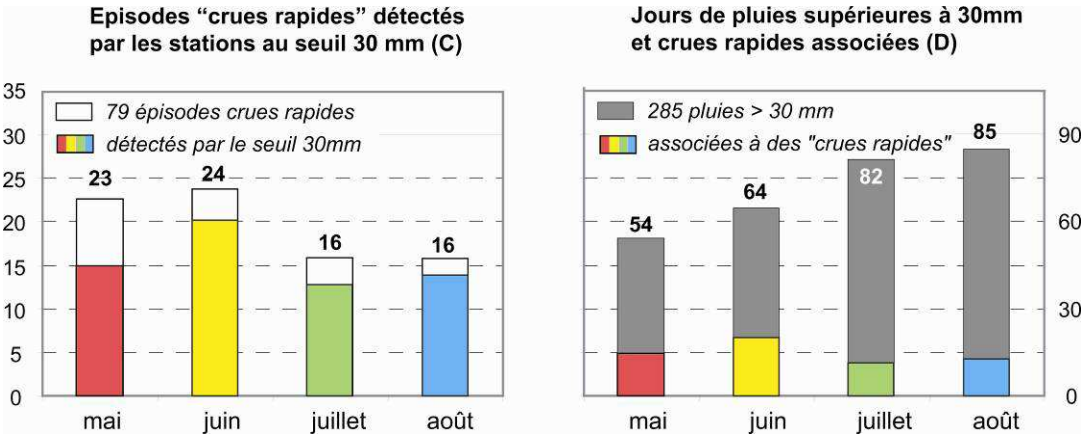


Fig. 4.15. Episodes de pluies > 30mm et relation avec les « *crues rapides* » (1983-2005).

Trois hypothèses sont envisagées pour expliquer les écarts pour le mois de mai. Soit les cellules orageuses sont rares et donc plus difficiles à détecter ; elles seraient ainsi passées au travers de la maille des 85 stations sélectionnées. Soit les épisodes sont de plus courte durée, ce qui est confirmé pour le 7 mai 1999 (23,2 mm tombés en 20 minutes). Soit les antécédents climatiques et les cumuls des jours précédents abaisseraient les seuils de déclenchement.

Cette troisième hypothèse est étudiée (fig. 4.16.). On remarque tout d'abord que plusieurs épisodes pluvieux se succèdent durant plusieurs jours : **mai 1988** (du 7 au mai, 9 mai, 16 mai, 25 mai), mai 1992 (du 25 au 31 mai), **mai 1994** (du 14 au 16 mai), **mai 2000** (du 6 au 13 mai). Les données ont ensuite été collectées sur les 5 jours (j_{-5}) et les 10 jours (j_{-10}) précédant la date des 23 épisodes « *crues rapides* ». Les stations sélectionnées se situent à proximité des bassins touchés. **Plus les cumuls des pluies sont élevés sur les 5 ou 10 jours précédents, moins le cumul du jour j apparaît élevé (fig. 4.16.).**

Différents cas de figures apparaissent :
- pluies du jour j > 60 mm + pluies sur j_{-5} < 20 mm : 9 mai 1998, 13 mai 1998 ;
- pluies du jour j > 30 mm + pluies sur j_{-5} > 30 mm : 18 mai 1996, 9 mai 2000, 11 mai 2000 ;
- pluies du jour j < 10 mm + pluies sur j_{-1} > 30 mm : 25 mai 1988, 15 mai 1994, 7 mai 2000 ;
- pluies du jour j < 10 mm + pluies sur j_{-3} > 60 mm (10 mai 2000).

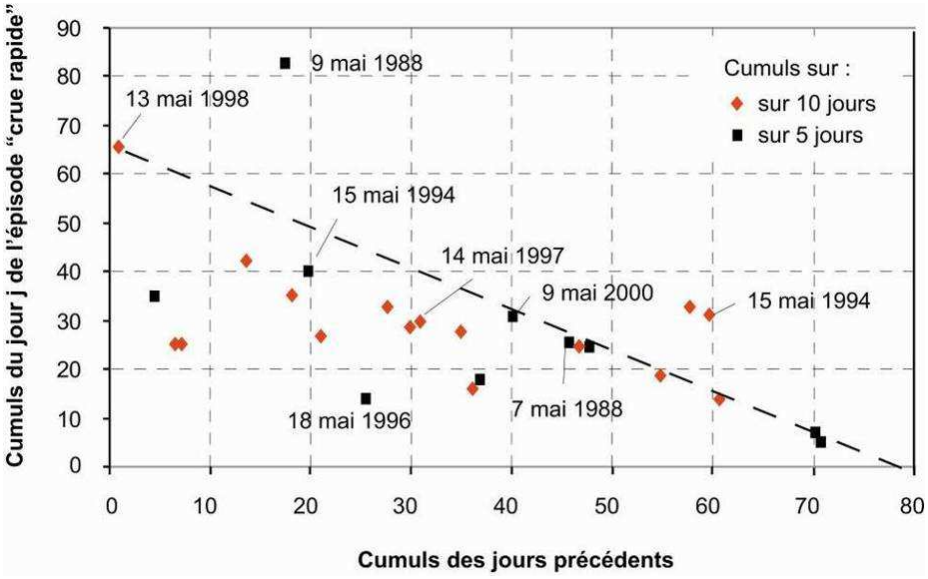


Fig. 4.16. Cumuls des jour j et des 5 et 10 jours précédant les épisodes « *crues rapides* ».

La relation avec les antécédents climatiques est prouvée pour 15 épisodes sur 23 (65 %). Les cumuls des jours précédents abaisseraient ainsi les seuils de déclenchement en mai. La complémentarité avec les cumuls hivernaux n'apparaît pas dans les données utilisées : les crues en mai 1988 et 1997 sont systématiquement précédées d'hivers secs**.**

En revanche, il y a bien une phase de préparation qui fait la transition avec les crues turbides hivernales. Si certains épisodes recensés entre juin et août sont également associés à des antécédents (juillet 1994, juin 1997), la relation est, en revanche, moins systématique.

4.3. Evolution de l'aléa pluviométrique (1983-2005)

Une question demeure : les seuils de déclenchement des « *crues rapides* » ne semblent pas avoir évolué dans le temps et pourtant, le **nombre d'événements a augmenté sur la période 1992-2001.** Cette question n'est pas si simple à trancher. L'analyse de la pluviométrie s'est limitée jusqu'à présent à des données associées à des « *crues rapides* ». Sans enregistrer un changement de seuil, il est possible que le déclenchement soit plus systématique lorsque :

- les maxima quotidiens donnent des hauteurs d'eau plus élevées ;
- les systèmes précipitants présentent une plus grande étendue spatiale ;
- l'intensité des pluies soit plus élevée alors que le cumul quotidien reste identique.

Afin de vérifier ces hypothèses, les données des stations ont de nouveau été utilisées.

4.3.1. Distribution des maxima dans le temps

La distribution dans le temps des maxima de rang 1 (fig. 4.17.) montre que les valeurs les plus fortes sont recensées durant la dernière décennie. Les maxima sont annuellement observés au cours de la période 1992-1999 mais ils sont, en revanche, moins nombreux entre 1983 et 1992. La répartition des pluies extrêmes des rangs 2 et 3 est plus homogène entre les années ; celles-ci se positionnent indifféremment sur la période donnée (Annexe 4.4.). Les maxima de rang 3 sont répétitifs pour certaines années (1987, 1994, 1999). La distribution temporelle des Episodes Précipitants Significatifs (EPS) a aussi été analysée. Ces systèmes précipitants, présentant une forte extension spatiale, semblent plus fréquents à la fin des années 1990 : sur les 20 EPS recensés, 13 sont apparus entre 1992 et 2001 (fig. 4.17.).

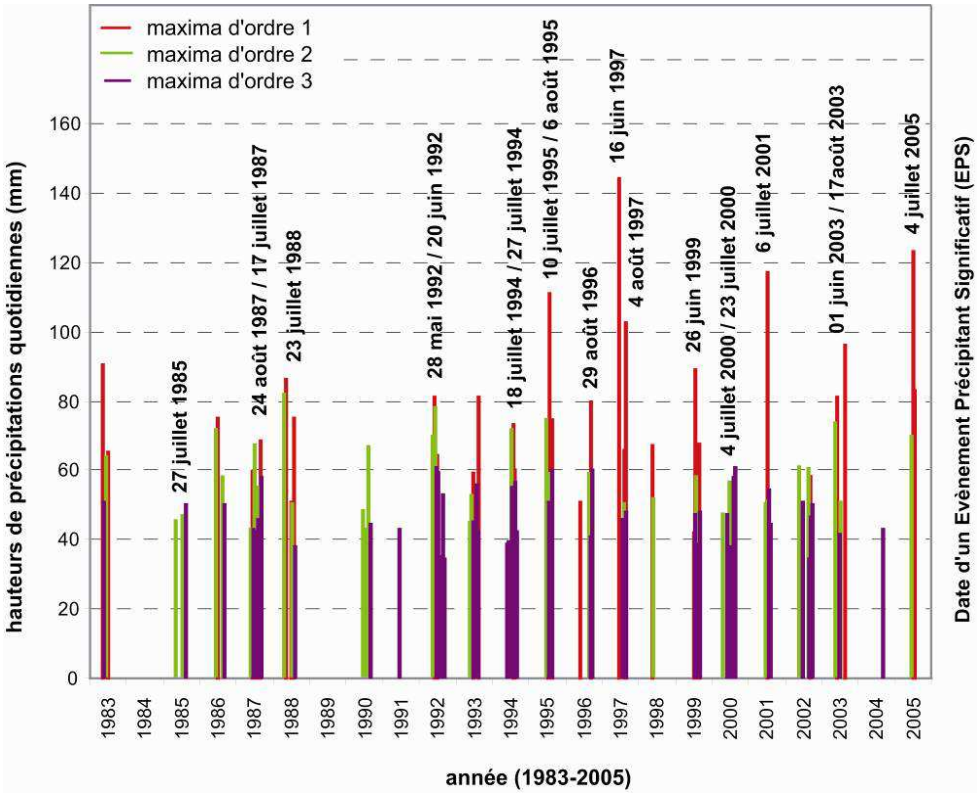


Fig. 4.17. Répartition des maxima des trois premiers rangs sur les 85 stations (1983-2005).

Le nombre de maxima cumulé par année (fig. 4.18.) met en avant une concentration des plus fortes valeurs à partir de 1992. Cette évolution n'est toutefois pas constante puisque les variations sont importantes entre les années. L'année 1992 s'individualise assez nettement avec plus de 35 stations qui présentent des maxima (les trois premiers rangs) communs. Les records pluviométriques sont également fréquents pour les années 1987, 1994, 2000 et 2005. A l'inverse, ils sont faiblement recensés au cours des années 1984, 1993, 1998 et 2004. On tient ici compte des doublons entre les stations, ce qui permet de donner un poids plus élevé aux épisodes à forte extension spatiale détectés par plusieurs stations.

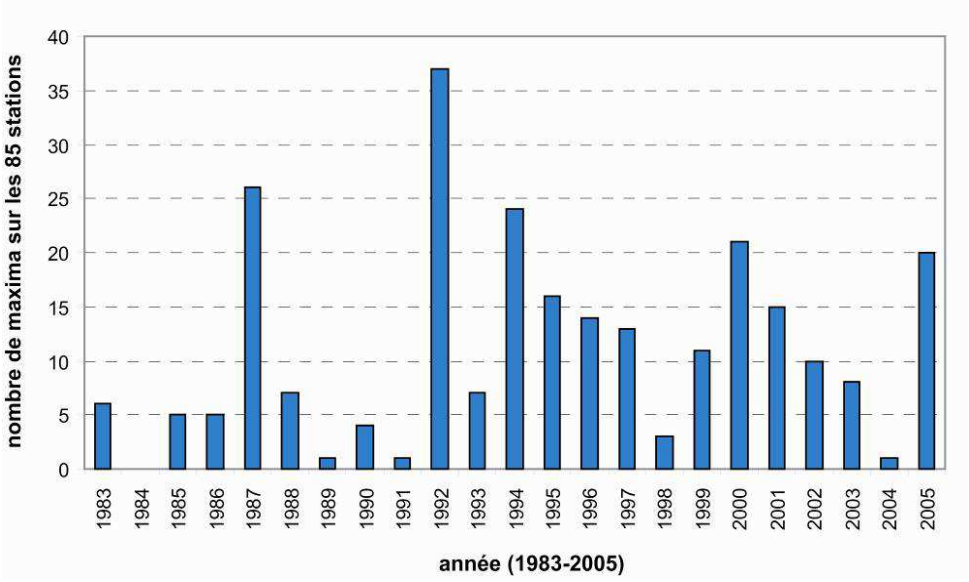


Fig. 4.18. Nombre de maxima (trois premiers rangs) cumulés par année (1983-2005).

On observe donc une **répétition croissante** des maxima quotidiens, une augmentation de leur intensité et une succession d'Episodes Précipitants Significatifs à partir de 1992, ce qui pourrait, en partie, expliquer la recrudescence des « *crues rapides* » à cette période.

4.3.2. Evolution des pluies supérieures à 30 mm

Le seuil de 30 mm peut également être utilisé pour déceler une éventuelle augmentation sur la période 1983-2005. L'analyse reste délicate à mener puisque les hauteurs d'eau ne sont pas toujours révélatrices de l'intensité des épisodes.

L'étude du nombre de jours de pluies supérieures à 30 mm pour la période « *mai-août inclus* » met en avant une recrudescence des pluies supérieures à ce seuil à partir de 1992 (fig. 4.19.) et un accroissement de leur fréquence jusqu'en 2005 : à l'exception de 1998, plus de 10 épisodes sont annuellement observés. D'importantes variations locales existent entre les stations, et il serait illusoire de replacer cette tendance, observée à une échelle régionale, dans le débat plus large du « *réchauffement climatique* » (Delahaye, 2002).

Sans enregistrer une variation du seuil physique de déclenchement, l'apparition des catastrophes semble plus systématique à cause d'un accroissement des pluies > 30 mm. Ce constat replace au premier plan le rôle de l'intensité des pluies sur la sensibilité des espaces, facteur qui est difficile à prendre en compte en étudiant les hauteurs de pluies quotidiennes.

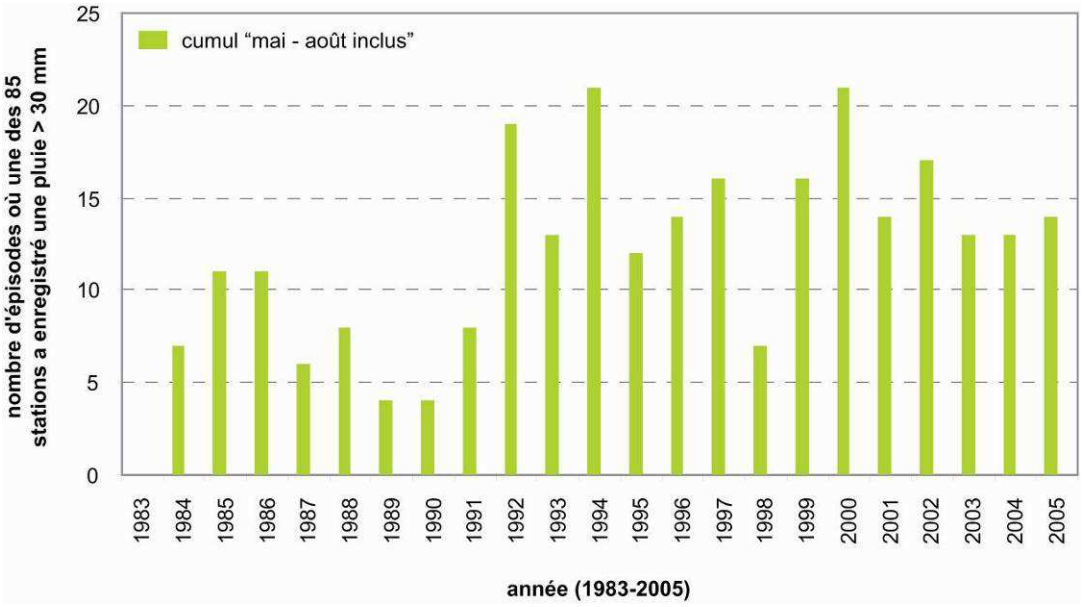


Fig. 4.19. Jours de pluies > 30 mm cumulés par année entre mai et août inclus (1983-2005).

4.4. Types de circulations associées aux « *crues rapides* »

4.4.1. Méthode et données utilisées

Dans un dernier temps, on propose de **caractériser les types de circulations propices à l'apparition des épisodes** « ***crues rapides*** ». On prétend souvent que ce sont des épisodes orageux, et à travers cette étude, on souhaite mieux identifier les conditions atmosphériques qui donnent naissance aux systèmes fortement pluviogènes. L'échelle synoptique (ou échelle large) constitue, par excellence, le cadre de prévision opérationnelle sur une échéance de un à trois jours. On définit les « *types de circulations* » comme étant des **situations synoptiques caractérisées par les structures et les trajectoires des masses d'air.** Par opposition, les « *types de temps* » témoignent des rapports qui s'établissent entre l'échelle synoptique et les facteurs géographiques qui agissent à des échelles plus locales (Vigneau, 2004 ; Cantat, 2005).

L'analyse a été effectuée à partir de cartes et de *Bulletins Météorologiques Européens (BQE)* établis à différentes altitudes (500 hPa, 700 hPa, 850 hPa). Ces cartes sont consultables sur le site www.wetterzentrale.de. Une **première typologie** a été définie en fonction de la structure et des trajectoires des masses d'air à l'origine de l'instabilité observée le jour j de l'épisode « *crue rapide* ». L'identification et la classification des types de circulations ont été complétées par une **seconde typologie** qui prend en compte les situations sur les trois jours précédents et qui est basée sur la méthode objective de classification de Hess-Brezowsky développée par P. M. James (2007). Cette seconde étude a été réalisée en collaboration avec O. Planchon.

4.4.2. Quelques points de repères théoriques

Les épisodes orageux sont le plus souvent associés à des **systèmes frontaux** qui séparent deux masses d'air. Quand une masse d'air chaud se déplace plus vite qu'une masse d'air

froid, elle tend à s'élever et à surmonter l'air froid d'un seul bloc. La surface de discontinuité (ou **surface frontale**) est une surface de front chaud nommé **FC**. L'air froid forme dans ce cas un coin qui recule sous l'effet de la poussée de l'air chaud (fig. 4.20.). Lorsqu'une masse d'air froid vient chasser l'air chaud, l'air froid se glisse sous l'air chaud à cause de sa densité plus forte. Le front froid (**FF**) est de faible pente en altitude mais il devient abrupt près du sol.

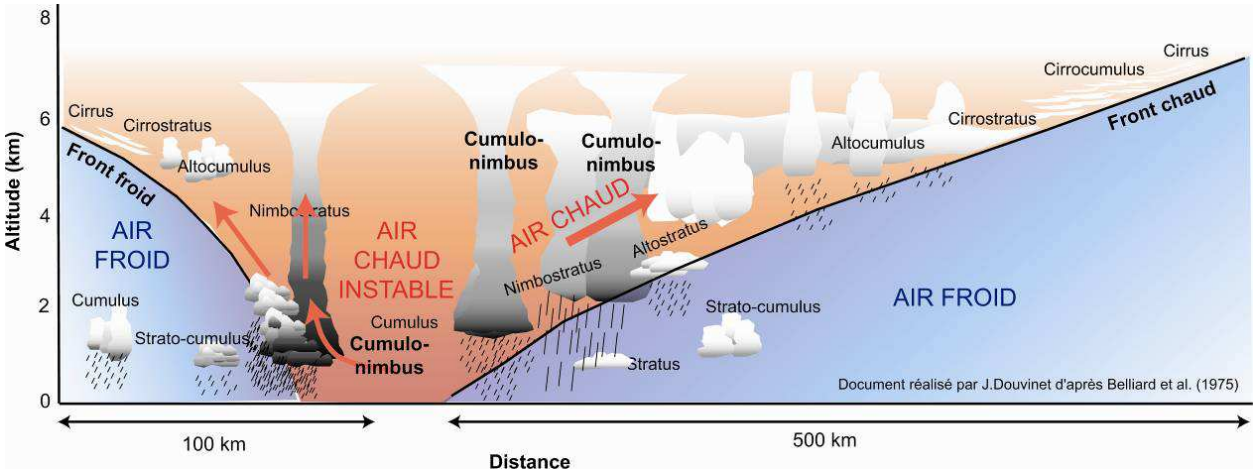


Fig. 4.20. Nuages et pluies associés à un front froid et à un front chaud.

Le soulèvement de l'air chaud a pour effet de rompre l'équilibre de la masse d'air. En cas d'instabilité, toutes les masses nuageuses qui se forment au sein de l'air chaud ont un aspect cumuliforme**.** Le long du front chaud, les *Altocumulus*, dont les sommets sont bourgeonnants, sont les signes d'une situation pré-orageuse. Ils sont suivis d'une masse nuageuse formée de *Nimbostratus* au sein de laquelle sont noyés des *Cumulonimbus*, accompagnés d'orages, de pluies continues ou d'averses discontinues dont l'intensité varie brusquement. Précédé de bancs d'*Altocumulus* pré-orageux, le front froid (**FF**) se présente comme une masse nuageuse puissante d'où émergent des enclumes de *Cumulonimbus,* accompagnées là aussi de violentes averses, d'orages et de variations brutales de la vitesse et de la direction du vent. L'alignement de *Cumulonimbus* le long du front froid forme une « *ligne de grains* ».

Les pluies intenses peuvent également être associées à des orages de masses d'air qui se produisent en l'absence de fronts. De l'air continental peut stagner sur le nord de la France si l'anticyclone qui a amené cette masse d'air chaud faiblit ou s'éloigne sans qu'aucun autre système de pression (dépression, nouvel anticyclone) ne le remplace. On a alors affaire à un marais barométrique (**MB**) où les courants sont nuls ou faibles (E/NE) dans toute l'épaisseur de la troposphère. Il n'y a pas, ou très peu, de cisaillement. En raison de l'insolation et de la relative sécheresse, cet air se réchauffe fortement dans les basses couches ; l'instabilité tend à devenir de plus en plus forte en fin de journée et durant la nuit (Belliard *et al.*, 1975).

4.4.3. Structures et origines des masses d'air associées au jour j

La structure des masses d'air a été analysée le jour j de la date de recensement de la « *crue rapide* » à partir de plusieurs sources documentaires : images prises par le satellite NOAA-ESRL (*Earth Systme Research Laboratory*, www.cdc.noaa.gov) à 750 hPa ; cartes des situations atmosphériques sur plusieurs jours (http://weather.uwyio.ed) ; radiosondages pour certains épisodes proches de Trappes (www.meteocentre.com).

Sur les 79 épisodes « *crues rapides* », 53 (67 %) sont apparus dans des situations de marais barométriques (MB), et 26 sont liés au passage de systèmes frontaux (F) (33 %). **Ces résultats sont importants car les « *crues rapides* » semblent plus souvent déclenchées par des orages de masses d'air alors que les systèmes frontaux sont réputés pour être les plus violents.**

La trajectoire des masses d'air a aussi été identifiée ; les masses d'air circulant dans un flux de sud-ouest représentent 64 % des circulations et 87 % avec les flux de sud et d'ouest. Les masses d'air associées à des marais barométriques (**MB**) circulent principalement dans un flux de sud-ouest (30) et, secondairement, de sud (10). Dans le cas des situations frontales (**FC ou FF**), les flux viennent du sud-ouest (21) et de l'ouest (5). Les flux d'est, de sud-est et de sud sont tous associés à des marais barométriques. La répartition mensuelle démontre la prédominance des masses d'air circulant dans un flux de SW (51), le nombre plus élevé des flux de sud au cours du mois de mai (7) et du nord-est en août (4) (Annexe 4.5.).

Ces observations rejoignent les résultats de précédentes études menées dans les régions du nord-ouest de l'Europe (Pédélaborde, 1957 ; Escourrou, 1978, 1982, 2003). Les influences maritimes, véhiculées par des circulations d'ouest, prédominent. « *L'étendue géographique sous les influences maritimes est vaste en raison de l'absence de reliefs côtiers vigoureux et perpendiculaires susceptibles de bloquer les masses d'air d'origine océanique (…). Après quelques jours de canicule, le scénario est classique : en liaison avec des avancées d'air plus frais par l'Atlantique, la formation de fronts orageux vient systématiquement interrompre l'installation des influences sub-tropicales chaudes et sèches en provenance de la Péninsule ibérique ou de la Méditerranée* » (Cantat, 2005a).

Les situations synoptiques ont ensuite été analysées à partir des *BQE* (*Bulletins Quotidiens Européens)* et des cartes à différentes altitudes disponibles sur le site www.wetterzentrale.de. Sur le plan de la dynamique atmosphérique, l'apparition des épisodes orageux nécessite la présence de trois acteurs principaux (Cantat, 2005b, 2007) :

- la présence d'un air froid en altitude, une *dépression* (**B** pour Bas Géopotentiels), sous l'influence de la Dépression d'Islande et qui circule dans un flux de SE ;
- la proximité d'un air tropical chaud et humide, poussé par l'*anticyclone des Açores* (**H** pour Hauts-Géopotentiels) dans un flux de sud ;
- la présence de l'*Anticyclone de Scandinavie* (**H** pour Hauts-Géopotentiels) qui peut jouer dans une moindre mesure sur la zone de contact entre les deux précédentes masses d'air.

Une **typologie** est proposée à partir des observations faites à 700 hPa en fonction de la localisation des trois acteurs géographiques, de la nature et des trajectoires des masses d'air. La méthode de classification s'inspire d'un travail réalisé par Cantat (2006) dans la région de Draix. Les masses d'air formées au-dessus de la terre sont dites **continentales**, tandis que celles qui ont pris naissance sur les océans sont dites **maritimes.**

Cinq configurations ont été différenciées. Dans certains cas, l'air tropical est chassé par des courants maritimes plus ou moins dérivés. Le courant polaire est maritime (**Pma**), dérivé (**Pmad**), ou « *doublement dérivé* » (**Pmadd)**. Dans d'autres cas, l'air polaire maritime est chassé par de l'air tropical continental (**Tcont**) ou par de l'air tropical maritime (**Tma**) (fig. 4.21.).

Le cas le plus fréquent est l'arrivée d'un courant polaire maritime (**Pma**). La dépression arrive lentement par l'ouest et le sud-ouest. Elle a le temps de se charger en humidité sur la Manche et la Mer du Nord avant de se réchauffer à la rencontre de l'air chaud en place sur le continent. Au gré de la topographie locale (versants, bordures de plateaux), la masse d'air se déstabilise rapidement. Plus le courant polaire descend vers le sud, plus le courant devient dégradé (**Pmad**). L'air polaire forme souvent dans ce cas là une goutte froide (**GF**) en altitude.

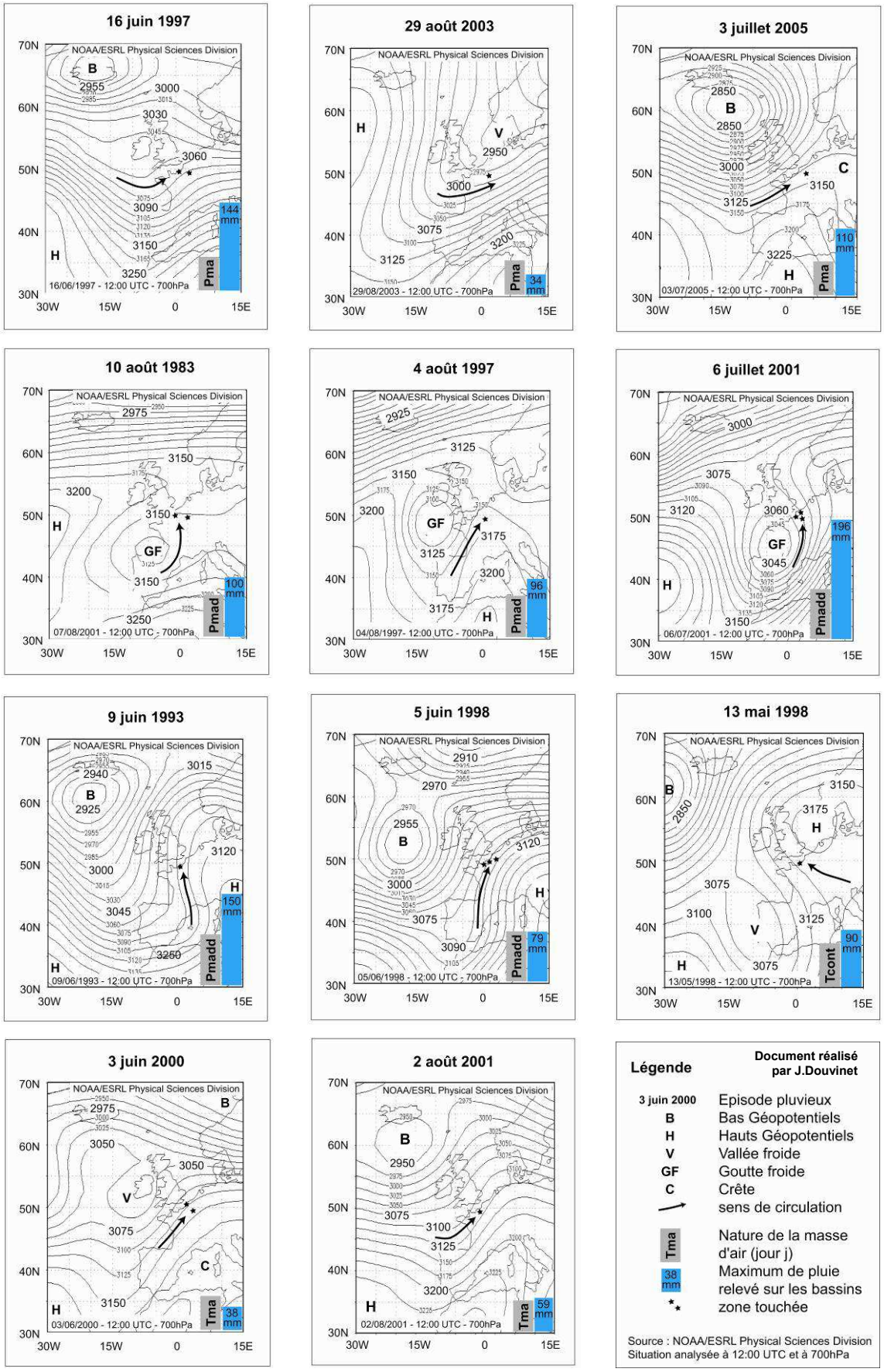


Fig. 4.21. Identification des situations synoptiques observées à 700 hPa le jour j de la date de recensement d'une « *crue rapide* » dans le nord de la France.

On considère que le courant polaire est « *doublement dégradé* » (**Pmadd**) lorsque la masse d'air va se recharger jusqu'au sud de l'Espagne. Plus l'air polaire maritime est dégradé, plus le contact entre les deux masses d'air semble violent, et plus il devient propice aux épisodes pluvieux de forte intensité. Les cumuls relevés lors des **Pmadd** sont d'ailleurs les plus élevés (fig. 4.21.). Le courant maritime peut, à l'inverse, être chassé par un air chaud continental **(Tcont**) ou par de l'air tropical maritime remontant du sud (**Tma**).

L'étude de la structure et des trajectoires des masses d'air montre finalement que :
1 - les arrivées d'un **air polaire maritime dégradé** sont des circulations préférentielles ;
2 - calmes en apparence, les **situations de marais barométriques sont très dangereuses** car le faible gradient thermique favorise l'expression des facteurs géographiques locaux.

Il est toutefois impossible de dresser une **classification** en fonction de la structure et des origines des masses d'air sur la totalité des épisodes. **Une seconde méthode est proposée.** Elle tient cette fois-ci compte des trajectoires des masses d'air sur les trois jours précédant la date de la crue. Ces résultats ne sont pas comparables à la précédente typologie, qui n'en reste pas moins intéressante à la lumière des conclusions rappelées ci-dessus.

4.4.4. Typologies sur j_{-3} d'après la méthode de Hess-Brezowsky

Une **typologie** est finalement proposée à partir de la méthode objective de classification de Hess-Brezowsky développée par James (2007) dans le cadre du programme COST-73. Depuis quelques années, les **types de circulations font l'objet d'une typologie européenne** : les *Wheather types*, ou *Grossewetter.* La méthode de classification est fondée sur l'analyse du champ de pression au niveau de la mer et du géopotentiel à 500 hPa au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe.

Cette méthode identifie **29 types de circulation**s (*GWL* = *Grosswetterlagen*), **regroupés en trois classes** (zonal, mixte et méridien) ou en **cinq grands types** (GWT = *Grosswettertypen*). La méthode a initialement été développée et mise à jour par le PIK (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) pour caractériser la circulation atmosphérique et sa variabilité sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe. Le catalogue des GWL quotidiens (Annexe 4.6.) a été utilisé pour diverses études statistiques de fréquence, persistance et probabilité de transition entre les GWL (Kyselý et Huth, 2006), mais rarement dans le cadre de recherches sur les liens entre la variabilité climatique et celle des écoulements fluviaux (Stahl *et al.*, 2002), ou entre des épisodes de fortes pluies et des inondations associées (Douvinet *et al.*, 2008).

L'analyse des types de circulations montre une grande variabilité dans le temps et dans l'espace des « *précipitations à risques* » et elle permet aussi d'identifier les caractéristiques des situations météorologiques qui en sont à l'origine. En référence aux trois classes principales (zonal, mixte, méridien), et pour l'ensemble de la période étudiée (mai à août inclus), près des deux tiers des épisodes sont liés à des circulations méridiennes alors qu'habituellement, ce GWL représente 42 % des cas observés au cours de cette période (fig. 4.22.).

Cette surreprésentation traduit le caractère pluviogène des circulations méridiennes. Le classement en cinq GWT fait ressortir, à parts égales, trois configurations principales :
- 27,8 % des épisodes pluvieux sont associés aux circulations de nord-ouest et nord ;
- 25,3 % aux circulations de sud ;
- 24,1 % aux circulations de nord-est et est.

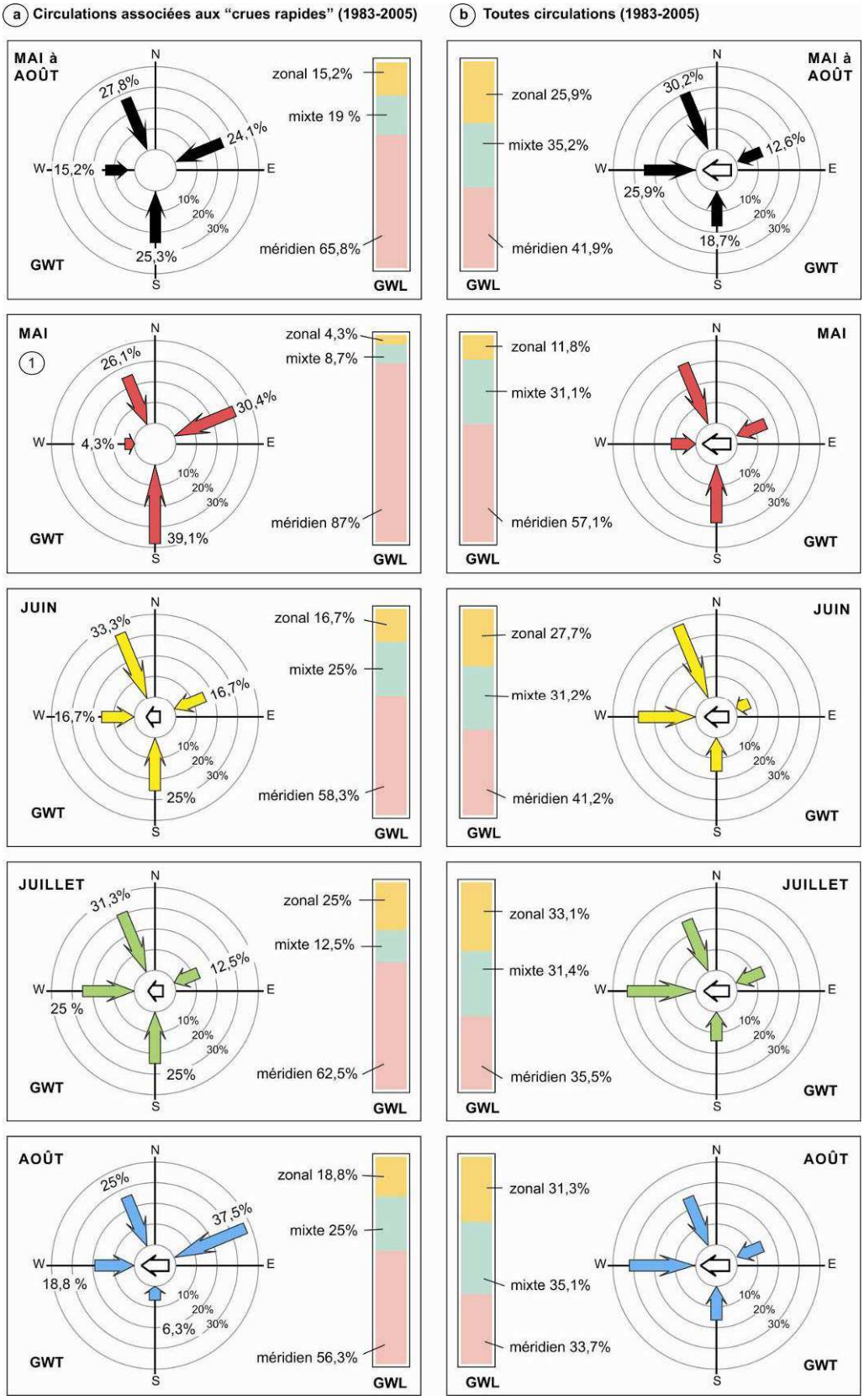


Fig. 4.22. **A/** Proportion d'événements pluvieux ayant généré des « *crues rapides* » (1983-2005), pour chaque classe principale de GWL et pour chaque GWT ; **B/** Comparaison avec l'ensemble des circulations atmosphériques sur la même période. Représentation des 5 classes de GWT sous forme de flèches orientées (W ; NW et N ; NE et E ; S) et d'une flèche blanche au centre de la rose des vents pour les situations à centre d'action sur l'Europe Centrale (EC).

Les 79 épisodes pluvieux sont associés à 71 % à des situations à centre dépressionnaire situé au large de l'Europe occidentale, en premier lieu à proximité des îles Britanniques, et secondairement à proximité du Portugal. Simultanément, un centre de hautes pressions de surface se situe sur l'Europe du Nord et/ou centrale. Mois par mois, les épisodes fortement pluvieux associés à des circulations méridiennes représentent plus de la moitié du total des événements. Le mois de mai est plus fortement concerné (87 %).

Ces circulations méridiennes de printemps sont liées au développement de situations à talweg d'altitude (bas géopotentiels) aux latitudes moyennes. Ces situations météorologiques ont une forte influence sur la cyclogenèse et les précipitations printanières sur l'Europe occidentale ; les espaces touchés par les pluies de forte intensité dépendant de la position en longitude de l'axe du talweg (Moron, 1990 ; Planchon, 2005). En été (soit au début du mois de juin), le courant perturbé est plus fréquemment zonal, même s'il est lent et relativement haut en latitude (fig. 4.22.).

Des précipitations orageuses intenses, sous la forme soit de cellules isolées, soit de fronts actifs, peuvent se produire sur l'espace étudié en fonction du type de circulation et de la trajectoire des perturbations (Doswell *et al.*, 1996 ; Delahaye, 2003). Les systèmes frontaux déclenchent des phénomènes orageux sur une plus grande extension spatiale. **La proportion d'événements fortement pluvieux pour chaque GWT, calculée mois par mois, permet non seulement de faire ressortir plus en détail les types de circulations générateurs de fortes pluies sur l'espace étudié, mais aussi d'en examiner l'évolution saisonnière.**

Les circulations perturbées de sud printanières, marquées en particulier par une position préférentielle des talwegs d'altitude à l'ouest du méridien-origine et des basses pressions de surface positionnées à proximité des îles Britanniques, caractérisent des **situations dites « *à anomalies pluviométriques positives* »** (Planchon, 2005). De mai à juillet, l'augmentation de la proportion des fortes pluies associées aux circulations de nord-ouest à nord et d'ouest au détriment de celles de sud, est à relier à **l'évolution saisonnière habituelle** de la circulation d'échelle synoptique décrite plus haut (réactivation de la circulation d'ouest en été).

L'importance prise par les circulations de nord-est et d'est en août (33,3 % contre 13,2 % en moyenne, fig. 4.22.) illustre le cas des situations à hautes pressions de surface centrées sur l'Europe du Nord, s'opposant à la progression vers le nord-est des systèmes perturbés liés à un centre de basses pressions généralement situé sur le proche Atlantique. **Ainsi, les pluies violentes, plus fréquentes en début d'été (juin et juillet) sur la partie sud-ouest de la zone d'étude, tendent à se décaler vers le nord au mois d'août. Un gradient spatial, commun aux observations précédentes, est donc à nouveau retrouvé à l'échelle synoptique.**

Les 20 épisodes majeurs à forte extension spatiale (fig. 4.4.) sont majoritairement associés (fig. 4.7.) à des circulations méridiennes (15 épisodes sur 20) venant du sud et du nord-est. Les épisodes affectant des espaces plus restreints sont majoritairement liés à des circulations de sud et de nord-ouest (donc méridiennes là aussi) ; un certain rééquilibrage s'opère avec les circulations zonales et mixtes. Ces résultats confirment le caractère **aléatoire** des épisodes localisés qui apparaissent dans les **circulations méridiennes fortement pluviogènes.**

Le nombre de bassins touchés en fonction du type de circulations montre à quel point les épisodes pluvieux à forte extension spatiale sont extrêmement virulents dans des circulations zonales (16 juin 1997, 4 juillet 2005) et mixtes (9 juin 1993, 6 août 1995, 6 juin 1998). Il faudrait finalement axer la prévision sur ce type de circulations si on veut mettre en place un système d'alerte efficace et opérationnel face au risque « *crues rapides* ».

	GWT (Grosswettertypen)					GWL (Grosswetterlaggen)		
	W	S	NW / N	NE / E	Europe C.	zonal	mixte	méridien
20 épisodes à forte extension spatiale	2	6	2	8	2	2 (10%)	3 (15%)	15 (75%)
19 épisodes détectés par des stations	4	6	7	2	0	4 (21%)	4 (21%)	11 (59%)
29 épisodes intenses et de courte durée	4	8	9	5	4	4 (14%)	7 (24%)	18 (62%)

Tab. 4.7. Types de circulations associés aux épisodes pluvieux à l'origine des « *crues rapides* ».

Conclusions du chapitre 4

L'analyse de la dynamique des précipitations de forte intensité, à des échelles spatiales et temporelle fines, a permis d'améliorer les connaissances sur l'aléa pluviométrique à l'origine des « *crues rapides* » apparaissant dans les régions du nord de la France. On peut finalement répondre aux quatre questions initialement posées en introduction :

► Les épisodes orageux associés à des « *crues rapides* » sont-ils homogènes ?

Dans 80 % des événements déclarés, les épisodes ont donné lieu à des pluies > 40 mm. Si les stations mesurent, de manière ponctuelle, ces abats d'eau remarquables, les données des stations bénévoles et les images radar sont requises pour compléter les mesures aux échelles fines. On peut différencier des phénomènes pluviométriques affectant de grands espaces (20) et des épisodes focalisés sur des espaces géographiques plus restreints (48). **Cependant, les pluies à l'origine des « *crues rapides* » sont extrêmement variables et hétérogènes entre les événements, voire entre des bassins versants proches. Ce constat replace au premier plan le rôle de l'intensité de la pluie sur la sensibilité de l'espace et des facteurs géographiques (morphologie, occupation du sol) jouant sur le déclenchement des crues.**

► Quel est le seuil de déclenchement nécessaire à l'apparition des « *crues rapides* » ?

En étudiant les données à partir d'un réseau de stations harmonieusement réparties dans l'espace, on arrive à détecter **47 % des épisodes en étudiant les maxima quotidiens des trois premiers rangs**. Ce pourcentage montre à quel point les précipitations à l'origine des crues sont souvent associées à des records pluviométriques (1983-2005) mesurés dans ces régions. L'étude « *par seuil* » améliore considérablement la part des épisodes détectés. Le seuil 30 mm est suffisamment représentatif pour être une « *averse extrême caractéristique* » pour laquelle une « *crue rapide* » peut apparaître, même s'il faut tenir compte de l'éloignement de la station et les possibilités de sous enregistrement de l'intensité des pluies.

Les crues recensées au mois de mai sont, en revanche, associées à des pluies plus faibles qui sont également liées à des antécédents hydroclimatiques. **La part des épisodes détectés est considérablement améliorée en abaissant les seuils d'intensité, passant de 9 % au seuil de 50 mm à 70 % à 30 mm. Ces événements font la transition entre un système hivernal et un système estival (juin – août inclus).**

L'étude « *par seuil* » confirme néanmoins que les précipitations de forte intensité sont une variable **nécessaire** mais pas **suffisante** pour expliquer l'apparition des « *crues rapides* ». 60 % des pluies supérieures à 50 mm et 78 % des pluies supérieures à 30 mm ne sont pas associées à de tels événements dans ces régions du nord de la France.

► Les orages apparaissent-ils plus fréquemment dans certains secteurs privilégiés ?

L'analyse de la distribution dans l'espace des maxima souligne **l'existence d'un gradient spatial** qui est confirmé par l'étude « *par seuil* » et par l'étude des types de circulations synoptiques. Les pluies de forte intensité semblent ainsi plus fréquentes au mois de juin dans la partie occidentale (Calvados, Seine-Maritime, Eure), en juillet dans la partie centrale de la zone d'étude (Seine-Maritime, Pas-de-Calais, sud de l'Aisne), et en août dans le Nord. **Ce gradient spatial peut en partie expliquer la distribution spatiale et temporelle des « *crues rapides* » constatée dans le chapitre 3.**

Il est cependant **difficile** de statuer sur cette question de manière définitive : les épisodes « *crues rapides* » sont associés à des marais barométriques (78 %) et le gradient thermique favorise, dans ce cas-là, l'expression de facteurs géographiques locaux accentués à toutes les échelles. Ces facteurs peuvent ponctuellement prendre le pas sur le gradient spatial.

► L'étude des pluies de forte intensité peut-elle expliquer la plus forte recrudescence d'événements au cours de la période 1992-2001 ?

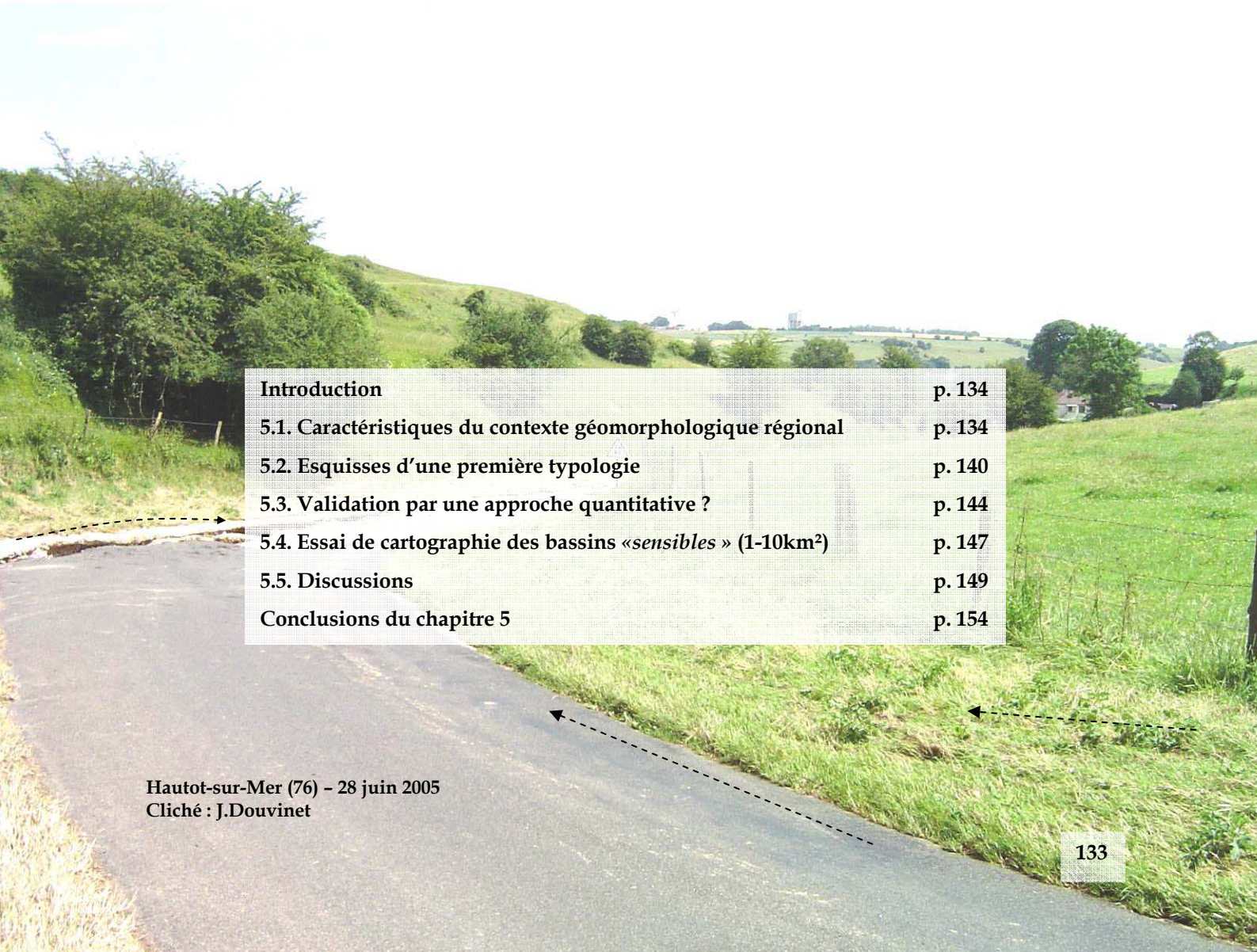
On observe une répétition croissante des maxima au cours de la période étudiée, une augmentation de leur intensité, et une succession d'Episodes Précipitants Significatifs (EPS) à partir de 1992. L'étude du nombre de jours de pluies > 30 mm met également en avant une recrudescence et un accroissement des pluies supérieures à ce seuil à partir de 1992. Il semble donc que l'aléa pluviométrique soit en partie responsable de l'augmentation des événements déclarés, même si ce constat est à relier à toutes les limites évoquées sur cet inventaire dans le chapitre 2. Les structures pluviométriques entre plusieurs stations proches présentent des variations importantes sans doute révélatrices de conditions locales. Il faut, à **moyen terme**, poursuivre l'analyse en étudiant la structure et la taille des masses d'air à échelle fine…

Tous ces résultats fournissent les éléments de base nécessaires à la mise en place d'un système d'alerte opérationnel face au risque « *crues rapides* ». Les circulations méridiennes sont potentiellement les plus pluviogènes, donc les plus « *à risque* ». Il convient également de prendre en compte les circulations zonales et mixtes puisque lorsqu'elles apparaissent, elles touchent un grand nombre de bassins. Les flux de sud-ouest à j_{-1} sont généralement les plus aptes à déclencher des systèmes instables. Toute la difficulté du système d'alerte réside dans les **imbrications des niveaux spatiaux**, entre les échelles synoptiques et les échelles fines où les composantes locales agissent (Neppel, 1997).

Un système d'alerte croisant un **système de prévision météorologique** (variable suivant la saison étudiée) et **le fonctionnement hydrologique des bassins versants** semble l'outil le plus approprié. **Différents seuils d'alerte** devraient être combinés pour mettre en place une politique de prévision efficace dans ces régions.

Chapitre 5

Caractéristiques morphologiques et portraits types des bassins versants sensibles aux « *crues rapides* »



Introduction	**p. 134**
5.1. Caractéristiques du contexte géomorphologique régional	**p. 134**
5.2. Esquisses d'une première typologie	**p. 140**
5.3. Validation par une approche quantitative ?	**p. 144**
5.4. Essai de cartographie des bassins «*sensibles* » (1-10km²)	**p. 147**
5.5. Discussions	**p. 149**
Conclusions du chapitre 5	**p. 154**

Hautot-sur-Mer (76) – 28 juin 2005
Cliché : J.Douvinet

Introduction

Dans ce chapitre, la sensibilité de la **composante morphologique** est étudiée. L'incidence de ce paramètre a très souvent été minorée dans ces régions et pourtant, tous les exemples de « *crues rapides* » mettent en évidence l'importance du système de pentes au sein des bassins et de l'organisation spatiale des réseaux de talwegs (Hauchard *et al.*, 1999 ; Delahaye, 2002).

Un portrait type du bassin versant sujet aux « *crues rapides* » printanières et estivales a déjà été proposé par D. Delahaye (2002) pour la Seine-Maritime. Ce sont systématiquement des bassins de petite taille (< 40 km²), à fortes pentes et qui se raccordent aux fonds de vallée humide par un **système d'emboîtement de « *vallons secs* ».** Ces bassins (d'ordres 2 et 3) sont souvent situés à l'aval d'un bassin beaucoup plus grand (ordre 4 et plus). En s'appuyant sur la méthode d'ordination d'A. N. Strahler (1957), qui consiste à attribuer une valeur à chaque tronçon en partant des têtes de bassins, la confluence de bassins incriminés se caractérise par un saut de deux ordres voire plus.

Ces traits communs ont néanmoins été établis sur des vallons qui sont tous localisés en Seine-Maritime. **Ce chapitre a, dès lors, pour objet de répondre aux questions suivantes :**

► **ce portrait type est-il transposable sur les 189 bassins versants touchés ?** Répondre à cette question nécessite de présenter le contexte géomorphologique régional, et de voir si une typologie peut ensuite être proposée en fonction de la position de ces bassins ;

► **peut-on mettre en évidence d'autres critères de sensibilité morphométriques ?**

► **les « *crues rapides* » apparaissent-elles plus fréquemment dans certains secteurs qui présentent des configurations morphologiques privilégiées ?** Si **oui**, cela veut dire qu'il existe un stock de bassins potentiellement prêts à réagir en cas de fortes pluies ; dans ce cas-là, l'aléa pluviométrique commande l'apparition des « *crues rapides* ». Le cas échéant, à elle seule, la variable morphologique n'est pas suffisante pour expliquer la distribution spatiale des bassins touchés. Il faut alors chercher d'autres facteurs de prédisposition.

► **est-il possible de localiser tous les bassins morphométriquement « *sensibles* » ?**

Une approche à plusieurs niveaux est proposée pour répondre à ces questions. Après une présentation des principaux éléments structurants à l'échelle régionale (§ 5.1.), une analyse descriptive de la position des bassins versants par rapport au contexte régional est envisagée (§ 5.2.). Différents critères de sensibilité sont ensuite mis à jour (§ 5.3.), et la pertinence d'une cartographie des bassins « *sensibles* » est commentée (§ 5.4.). Une lecture à *méso-échelle*, en lien avec la distribution spatiale des espaces urbanisés, apporte d'autres éléments de réponse sur les configurations potentiellement les plus « *à risque* » (§ 5.5.).

Ce travail doit finalement permettre de **statuer** sur la **spécificité morphologique** des 189 bassins touchés et de **vérifier** la plus forte prédisposition de certains secteurs géographiques.

5.1. Caractéristiques du contexte géomorphologique régional

Au préalable, la présentation se propose de rappeler les principaux éléments structurants du Bassin Parisien (Pinchemel, 1954 ; Battiau-Quesney, 1993 ; Laignel, 1997 ; Quesnel, 1997).

5.1.1. Le Bassin Parisien, héritage d'une longue accumulation sédimentaire

Le Bassin Parisien est l'archétype d'un bassin sédimentaire, **constitué d'un empilement de couches meubles et cohérentes** se relevant vers les périphéries (marge occidentale, vers le Calvados, et orientale, vers la Marne), et dans lequel l'érosion fluviatile a créé des **formes** de relief particulières. L'accumulation d'une telle quantité sédimentaire n'a pu se réaliser qu'à la suite d'une longue phase de subsidence (Klein, 1975), et les couches superposées sont issues des transgressions et régressions marines qui se sont succédées à partir du Lias.

Le bassin est ainsi constitué d'un **ensemble des terrains post-carbonifères** qui s'appuient sur le Massif Armoricain à l'ouest, le Massif Central au sud, les Vosges à l'est, et le Massif Ardennais au nord-est (Debelmas, 1991). *«Il est largement ouvert au nord où le bassin belge en est la continuation naturelle, et vers la Manche au-delà de laquelle on retrouve des assises semblables au sud de l'Angleterre »*. Une coupe géologique simplifiée allant d'ouest en est (fig. 5.1.) montre la **disposition en auréoles des différentes assises**, les plus récentes étant au centre du Bassin.

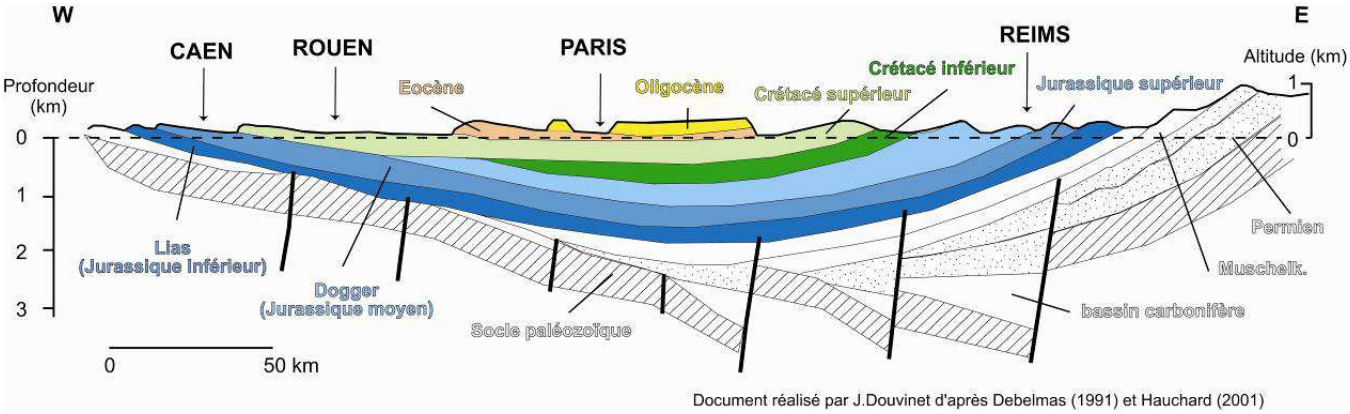


Fig. 5.1. Structure schématique simplifiée du Bassin Parisien.

Le pendage des couches indique une inclinaison vers le centre du bassin qui résulte de la subsidence du centre du bassin à l'ère Secondaire et à l'ère Tertiaire, et du soulèvement plus accentué, au Néogène, des marges septentrionales, méridionales et orientales (Debelmas, 1991). Le Bassin Parisien forme désormais une **vaste surface d'aplanissement généralisée et soulevée** (*coastal plain*), que l'on appelle également *« un bassin intra-cratonique de plate-forme »*. Les formations tertiaires (altérites et argiles à silex) constituent un manteau discontinu tandis que les formations quaternaires, dominées par les couvertures limoneuses, peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres, notamment au centre du bassin.

5.1.2. Formes et reliefs hérités associés aux processus fluviatiles

En fonction de la stratigraphie, de la lithologie et du pendage, un réseau hydrographique subséquent ou conséquent a rapidement déblayé les terrains ameublis à la fin du Miocène. *« Son travail fut facilité et guidé par l'alternance régulière de terrains meubles, argileux ou sableux, et de couches dures marno-calcaires ou calcaires. C'est ainsi que se sont peu à peu dégagées des auréoles limitées par des cuestas, tandis que les grands cours d'eau étaient grossis des rivières subséquentes qui coulaient au pied des côtes »* résume J. Debelmas (1991).

Le Bassin Parisien ressemble désormais à un **vaste plateau à faible dénivelée** (avec des altitudes ne dépassant pas 250 m), légèrement incliné, dominé par quelques buttes témoins et entaillé par de nombreuses vallées sèches héritées des périodes périglaciaires (Larue, 2005). **Le relief, monotone, offre souvent l'illusion d'un même panorama.** La Picardie *« picarde »* est *« dominée par des plateaux ou des plaines que rien n'arrête dans leur développement, simplement nuancés par les dépressions des vallons ou le ruban verdoyant d'une vallée alluviale »* (Laganier, 2002). D'après la carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (1990), l'ouest du Calvados est constitué *« d'horizons de plateaux faiblement ondulés dont la surface topographique recoupe en biseau les couches crayeuses des assises crétacées qui plongent vers le nord-est »* (fig. 5.2.).

L'incision des vallées et la formation des terrasses fluviatiles se sont effectuées au cours des périodes froides du Quaternaire (Larue, 1995 ; Bogaart *et al*., 2003). C'est par l'agressivité des climats froids, et à cause d'importantes variations négatives du niveau de la mer, que les plaines ont été *« surcreusées »* par rapport aux plateaux (Debelmas, 1991 ; Chaput, 2005). A l'inverse, pendant les périodes interglaciaires, l'eustatisme positif a conduit au remblaiement des vallées par des alluvions qui apparaissent en terrasses lors du creusement ultérieur. C'est également aux actions périglaciaires que J. Debelmas (1991) attribue le modelé des versants des vallées, des cuestas et des buttes-témoins, la dissymétrie des vallées ou la cryoturbation des roches superficielles : il écrit ainsi que *« les versants exposés au sud ou à l'ouest, ravinés en été, sont respectivement plus raides que ceux faisant face au nord ou à l'est, modelés seulement par la solifluxion »*. Cette distinction entre les vallées a aussi été montrée par J.-P. Larue (2005).

Certaines **formes** sont **communes aux bassins sédimentaires** : les **cuestas** (Pays d'Auge, Tardenois, Soissonnais), les **boutonnières** (Pays de Bray, Boulonnais), dépressions associées à deux fronts de cuesta, et les **côtes** (Côte d'Or, Côte d'Ile-de-France, Côte de Bourgogne).

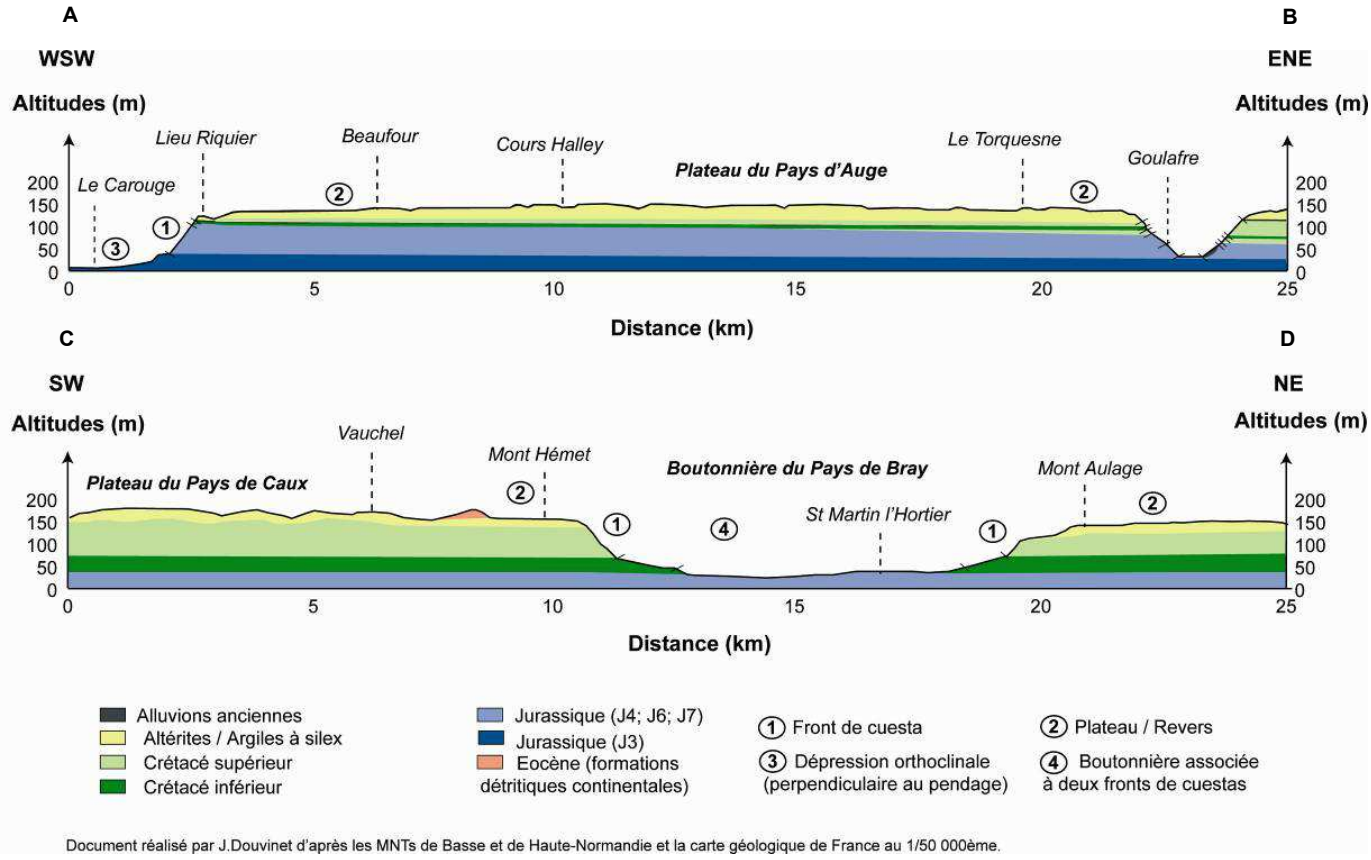


Fig. 5.2. Profils topographiques et pendages des couches géologiques sur deux coupes.

Figure 5.3. Croquis géomorphologique simplifié à échelle régionale

Les *fronts de cuesta* présentent des profils variables en fonction de l'importance relative de la roche dure supérieure et de la roche tendre inférieure. Les profils sont pentus lorsque la couche dure est épaisse et la roche tendre mince ; et inversement quand la couche tendre est importante (fig. 5.2). Les *buttes témoins* sont coiffées par un chapeau de roche résistante (Pays de Thelle) ; les *avant-buttes,* en roches tendres, sont disséminées en avant des coteaux ou des plaines structurales ; elles témoignent du démantèlement des séries sédimentaires.

A l'échelle régionale, les plaines et les plateaux s'opposent en fonction de leur forme plus ou moins ondulée, leur altitude, leur orientation et leur platitude. Les plaines du Santerre, d'Amiens, du Noyonnais, du Vermandois, de Caen et la Picardie « *parisienne* » (Angeliaume et Wicherek, 1997), sont de vastes plaines où les horizons sont mollement ondulés à cause du **faible encaissement des cours d'eau et des vallées.** De nombreux plateaux sont en revanche disséqués par de multiples vallées et vallons secs qui forment un paysage de collines avec un réseau hydrographique aux tracés « *capricieux* » (fig. 5.5.) : le Haut Pays d'Artois, l'Arrouaise, à l'est d'Arras et la Picardie « *picarde* ». La pente monoclinale explique l'absence de constance d'altitude, avec des glacis divergents de part et d'autre des interfluves.

Quand les éléments du drainage s'inscrivent vigoureusement dans le plateau, ils créent des « *vallées à corniche typiques* » (Coque, 1998) comme on peut le voir en Picardie « *picarde* » (fig. 5.4.). Lorsque la dissection devient très marquée, les interfluves séparant deux vallées, qui coulent parallèlement sur une courte distance, se réduisent à des *lanières* ou fragments de plateaux (Plateau d'Aliermont ; le Soissonnais). Des dalles gréseuses tertiaires peuvent aussi apparaître au dessus des plates formes précambriennes, comme par exemple au-dessous des sables thanétiens que l'on retrouvent en surface sur le plateau du Soissonnais (fig. 5.3.).

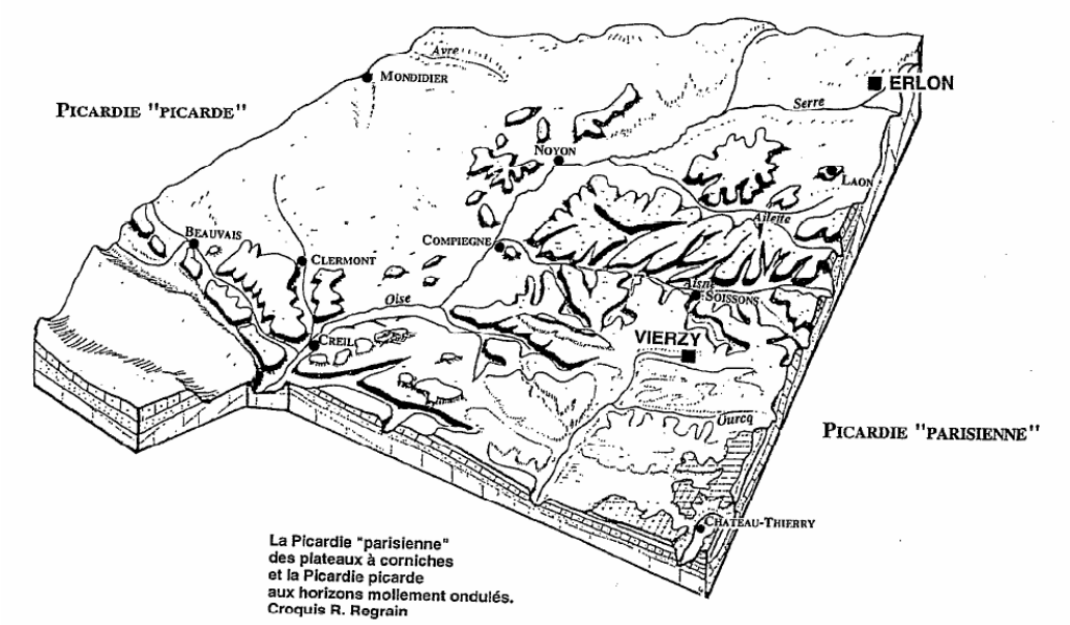


Fig. 5.4. Opposition entre les plateaux mollement ondulés et les « *vallées à corniche typiques* » des paysages hérités des périodes périglaciaires (Angeliaume *et al*., 1994).

Si le contexte géologique apparaît homogène à l'échelle régionale, les cours d'eau ont finalement dégagé différentes formes de relief en fonction de la stratigraphie, de la lithologie ou du pendage. La **transposabilité du portrait type** mis en évidence par D. Delahaye (2002) pour la Seine-Maritime, peut désormais être **testée** sur l'ensemble des bassins étudiés.

5.2. Esquisses d'une première typologie

Deux portraits types s'opposent très rapidement en fonction de la position des bassins versants par rapport aux principaux éléments structurants (fig. 5.5.) :

1 - le premier portrait type est défini à partir de caractéristiques morphologiques. Les bassins (**178 entités**) sont de **petite taille** (< 25 km²) ; ils présentent **des pentes fortes** et des **profils en long marqués**. Ces bassins (ordres 2 à 4) se situent en aval de plus grands bassins (ordres 4 et plus) ; leur confluence se caractérise par un saut de deux ordres voire plus. Ce « *hiatus* » dans l'ordination explique un **encaissement rapide** et la **présence des pentes fortes** (fig. 5.7.). On peut décomposer ce type 1 en deux sous catégories :

- 128 bassins se situent en aval de grands bassins versants (**Type 1.1**). Ce premier type correspond au portrait observé dans la Seine-Maritime qui est donc bien transposable dans les autres régions (Pays de Montreuil, Saint-Quentinnois, Tardenois) ;

- 50 bassins sont localisés sur des formes de relief spécifiques telles que les buttes-témoins, avant-buttes, talus, cuestas et boutonnières (**Type 1.2**). Ce deuxième type est lié à des particularités géomorphologiques locales (Pays de Thelle, Boulonnais, Haut-Pays d'Artois, Valois et Multien). Ces bassins n'avaient pas été localisés dans la Seine-Maritime car, à part la boutonnière du Pays de Bray, qui présente des pentes plus faibles que celle du Boulonnais et de la Thiérarche, de telles configurations n'existent pas. La cartographie réalisée (fig. 5.9.) met en évidence les bassins situés sur les buttes résiduelles (11), sur les plateaux à corniche (22) et les revers / fronts de cuestas (17).

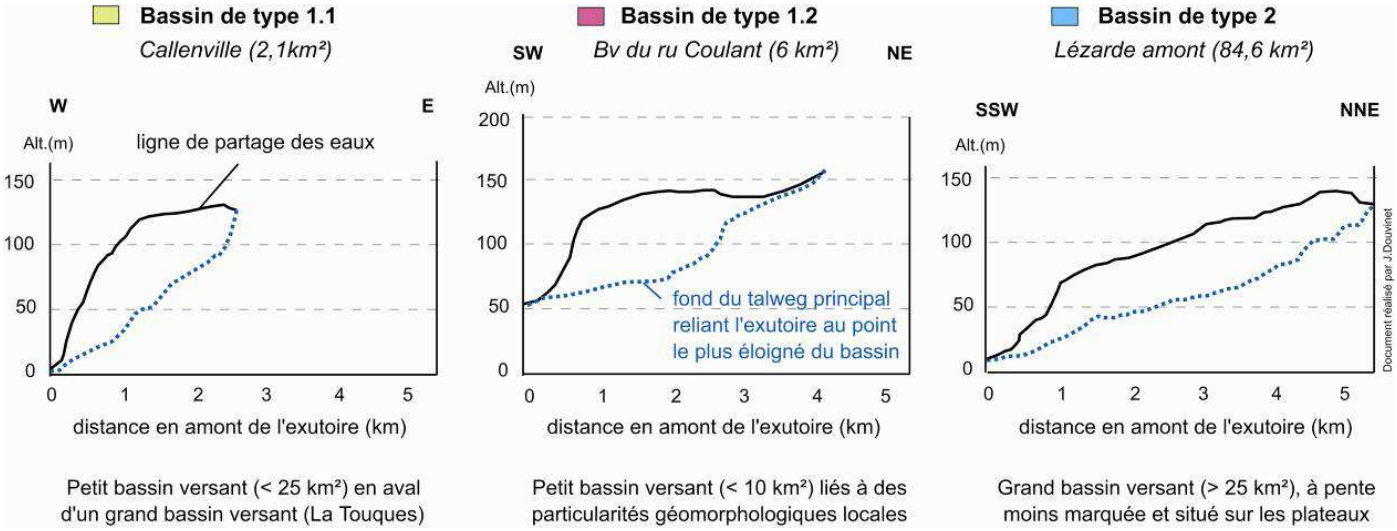


Fig. 5.5. Profils en long et degré d'encaissement pour trois types de bassins.

La différence d'altitude entre le fond du talweg et la ligne de partage des eaux permet de matérialiser le **degré d'encaissement** au sein des bassins et le **degré de régularisation** des talwegs vis-à-vis des niveaux de base locaux. L'incision est marquée sur les bassins du type 1.1 mais plus brutale et plus courte sur le type 1.2. Ces bassins paraissent **immatures** au sens géomorphologique du terme (fig. 5.5.) et l'énergie du relief compense la faiblesse des volumes de ruissellement générés par ces entités de petite taille (cf. chapitre 1).

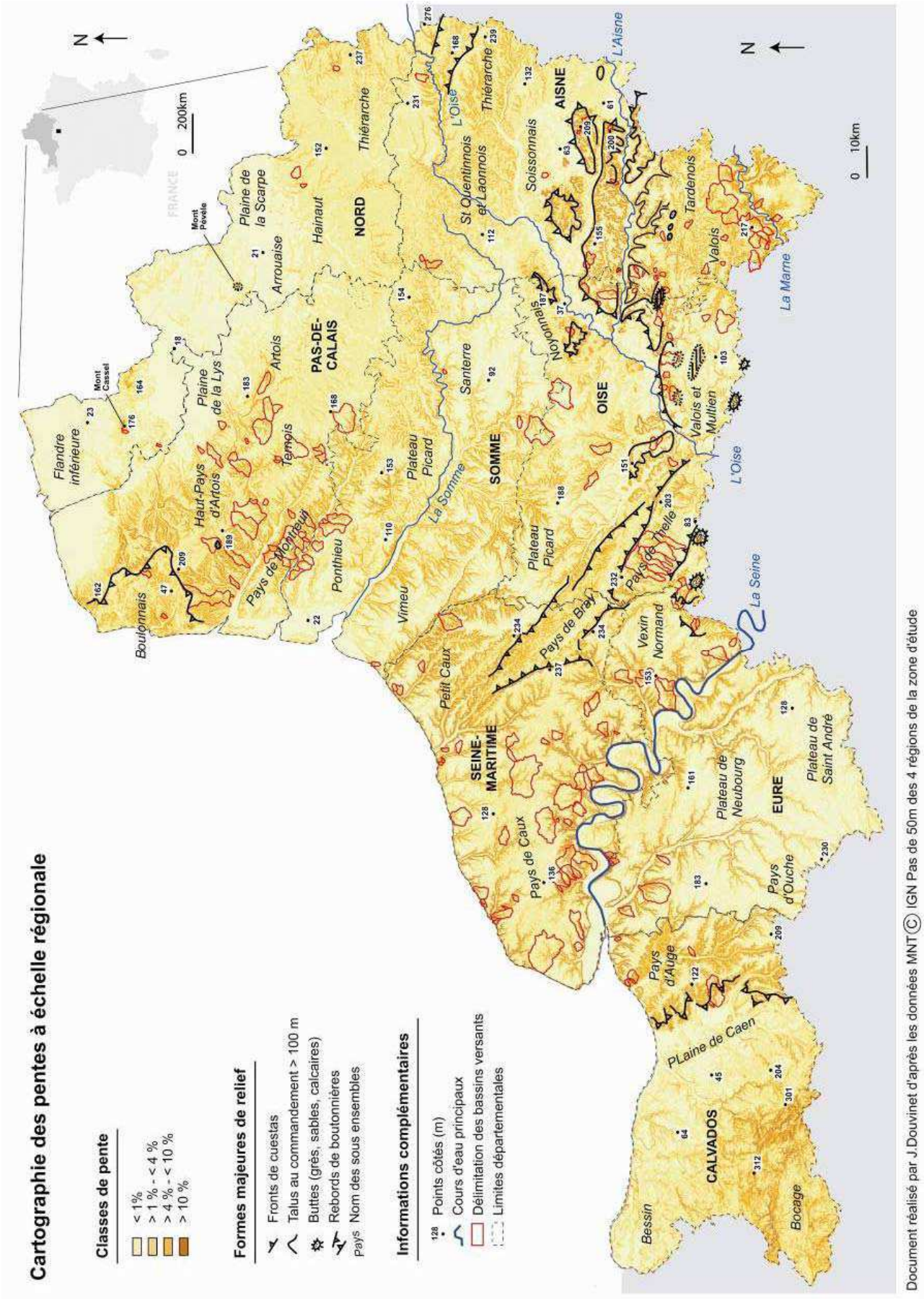


Fig. 5.6. Carte des pentes réalisée à une échelle régionale.

2 - Le second portrait type est défini par des critères morphométriques (taille, forme) et non pas par des caractères géomorphologiques. Il rassemble **11 bassins de grande taille** de 25 à 80 km², aux **formes compactes**, présentant une **pente moyenne plus faible** (fig. 5.5.) et une **dénivelée** qui reste **élevée** à l'échelle globale (fig. 5.9). Etant situés dans les parties amont de plus grands bassins versants, leurs confluences ne sont pas caractérisées par un saut d'ordre dans la classification de Strahler (fig. 5.7.). On recense ces 11 entités dans les plateaux du Pays de Caux, le Plateau Picard, le Ternois et le Valois. A l'inverse du type 1, les bassins incriminés sont beaucoup plus **matures**, avec un raccordement avec le niveau de base qui se fait de manière beaucoup plus régulière (fig. 5.5.).

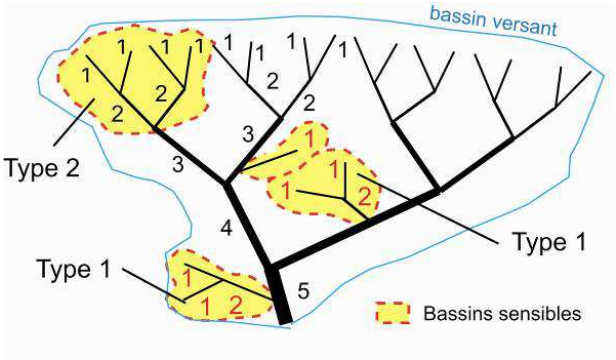


Fig. 5.7. Saut d'ordre dans la classification de Strahler et localisation des types 1 et 2.

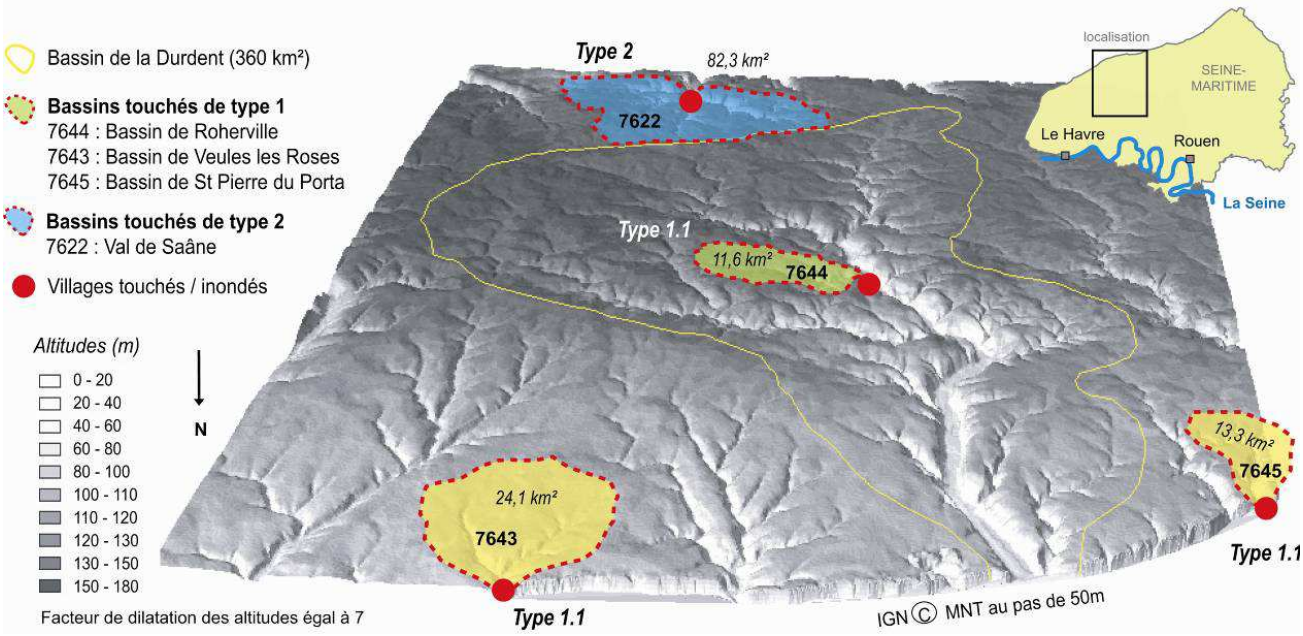


Fig. 5.8. Coexistence des deux portraits types dans le bassin de la Durdent, en Seine-Maritime (modifié d'après Delahaye *et al.*, 2007).

Les deux types, l'un lié à la morphologie, l'autre à des formes spécifiques, coexistent dans ces régions de plateaux et pourtant, leur distribution spatiale est différente. Utiliser la morphométrie comme facteur discriminant semble pertinent à la vue de cette première typologie. Des indices morphométriques ont, dès lors, été calculés sur les 189 bassins touchés, non seulement pour affiner la caractérisation de deux portraits types, mais aussi pour voir si on retrouve bien cette distinction en menant une approche quantitative.

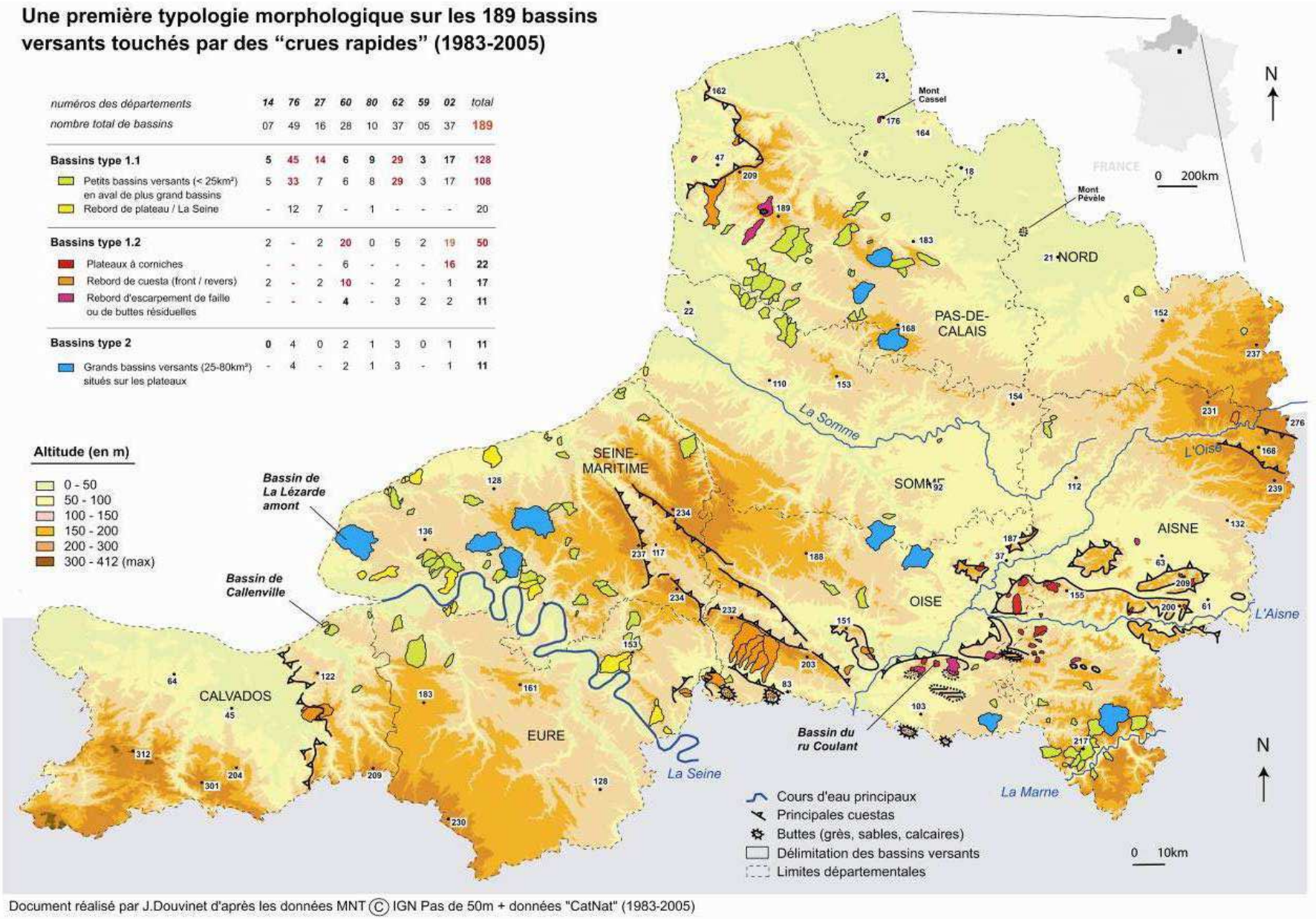


Fig. 5.9. Première typologie réalisée d’après une interprétation géomorphologique.

5.3. Validation par une approche quantitative ?

5.3.1. Méthodologie et données utilisées

Différents **indices morphométriques** ont été calculés sur les bassins étudiés (tab. 5.1.). Ils décrivent à la fois la **forme des bassins versants** (*surface, indice de compacité K² de Gravelius et indice de forme d'Horton Ih*), la relation entre la **forme** et **le réseau hydrographique** (*longueur du drain principal Lmax)*, **le degré d'allongement** du bassin (*indice d'allongement Rem de Caquot, indice d'étalement Ie de Morton)* et le **degré d'encaissement** au sein des bassins (*écarts-types des pentes STTD ; dénivelée Bh*). La plupart des indices ont été calculés de manière automatique (Annexe 5.1.). Les bassins ont été délimités, au préalable, à partir des courbes de niveau (pas de 25 m) visibles sur les IGN © SCAN 25 (1999) mis à disposition par les différentes régions.

Il aurait été possible d'ajouter l'ordre des bassins car plusieurs méthodes de calcul offrent aujourd'hui cette possibilité (Font, 2002). Toutefois, utiliser cette méthode d'ordination sur des bassins qui ne présentent pas toujours un réseau permanent est une **opération délicate**, qui présente certaines limites, notamment dans le choix de la classification à choisir et le type de drains à hiérarchiser (Le Pape, 1998 ; J.-L. Ballais, communication orale).

Indices morphométriques calculés	Notation	Formule / type de calcul	Données / logiciels utilisés
Surface du bassin versant (km²)	A	automatique (EFC)	SCAN 25 + Arc Map 9.1.
Périmètre du bassin versant (km)	P	automatique (EFC)	SCAN 25 + Arc Map 9.1.
Dénivelée ou différence des altitudes (m)	Bh	Alt. Max - Alt. Min	MNT © IGN + Hawth's tools
Altitude moyenne (m) (de Humbolt, 1842)	Hmoy	automatique (Hawth's tools)	MNT © IGN + Hawth's tools
Ecart-type des pentes (m)	SSTD	automatique (Hawth's tools)	MNT © IGN + Hawth's tools
Longueur du drain principal (m)	Lmax	manuelle	MNT © IGN + Réseau Hydro
Ratio de dénivelée (Rr) (Berger, 2001)	Rr	Rr = Bh / Lmax	MNT © IGN + Excel
Indice de Forme (Horton, 1945)	If	S / Lmax²	MNT © IGN + Excel
Indice de compacité (Gravelius, 1914)	K² / Kc	0,28 * P / √A	MNT © IGN + Excel
Indice d'allongement moyen (Caquot, 1960)	Rem	Lmax / √A	MNT © IGN + Excel
Indice d'élongation (Schumm, 1957)	IE	P / √A	MNT © IGN + Excel
Indice d'étalement (Morton, 1932)	Ie	Ie = A / (Pi (0,5 * IE) ²)	MNT © IGN + Excel

indices morphométriques commentés

EFC : ESRI Field Calculator - formule spécifique pour le calcul des surfaces et périmètres de polygones au formet Arc Map 9.1.
Hawth's Tools : extension utilisable sur Arc Map 9.1. : Extraction du MNT sur chaque bassin versant (Raster Toolds / Clip Raster to Polygone) puis calcul des paramètres statistiques sur chaque MNT (altitude maximum, altitude minimum, altitude moyenne, écart-type des pentes - Cf Propriétés).

Tab. 5.1. Choix des paramètres morphométriques étudiés et formules/logiciels utilisés.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) suivie d'une Classification Automatique Hiérarchique (CAH) a été testée en utilisant huit indices morphométriques. Le but recherché ici était de grouper les bassins aux caractères les plus ressemblants (Escoflier et Pagiès, 1990). Toutefois, les résultats sont extrêmement difficiles à interpréter car les indices sont fortement **dépendants** les uns des autres (Annexe 5.2.). Ce constat avait déjà été observé dans plusieurs études où de tels traitements avaient été tentés (Hirsch, 1962 ; Cauvin et Rimbert, 1996). En dépit d'une analyse multivariée combinatoire, l'étude des **relations bivariées** entre plusieurs indices a été préférée pour **détecter d'éventuels critères de sensibilité morphométriques.**

5.3.2. Mise en opposition des deux portraits types morphologiques

L'**analyse de la taille des bassins versants** touchés par des crues printanières et estivales confirme qu'ils sont majoritairement de petite taille : 70 % des bassins font moins de 10 km², et 50 % des bassins ont une taille inférieure à 5,4 km². Ces bassins présentent aussi de **fortes pentes** ; la dénivelée est comprise entre 26 m et 216 m (fig. 5.10.). La répartition des altitudes est homogène car la moyenne et la médiane (~ 100 m) sont très proches. Néanmoins, il n'y a pas de relation entre la taille des bassins versants et leur dénivelée (r^2 = 0,13), ce qui traduit une forte variabilité du relief au sein des 189 bassins étudiés.

Les graphes en boîtes (ou *boîtes à moustaches)* confirment l'opposition entre les deux types de bassins (fig. 5.10a). Les bassins du **type 1** sont de toute petite taille (75 % ont une taille qui est inférieure à 12 km²) et leur dénivelée est plus élevée (75 % des bassins ont une dénivelée de plus de 75 m). En revanche, le **type 2** est de plus grande taille (25 % sont plus de 28 km²) et les différences d'altitudes sont faibles (75 % des bassins ont une dénivelée < 103 m).

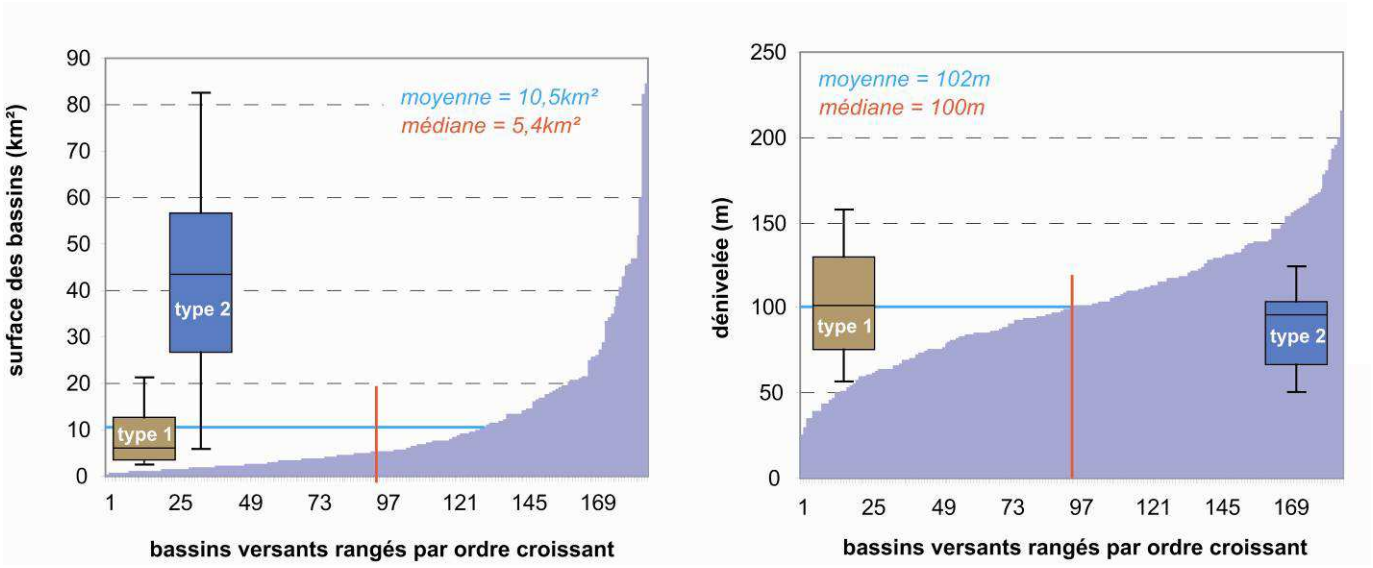


Fig. 5.10. Taille et dénivelée (rangées par ordre croissant) des 189 bassins versants étudiés.

D. Delahaye (2002) remarque que *« parmi ces petits bassins, les plus grands sont susceptibles de produire les crues les plus importantes car ils allient des caractéristiques morphologiques qui les rendent sensibles à ce genre d'aléa et des impluviums suffisamment grands »*. Si la relation se vérifie sur plusieurs bassins (St Paer, Ordrimouille), elle n'est pas systématique car des événements majeurs se sont produits sur des bassins de moins de 5 km². La part des surfaces urbanisées et des pluies violentes peuvent y expliquer l'apparition de crues violentes et catastrophiques.

La relation entre la taille des bassins versants et l'indice de compacité est ensuite étudiée (fig. 5.11a). Tous les bassins présentent globalement une forte compacité. Les bassins du type 2, de plus grande taille, sont proches au type 1.1, de petite taille. Des bassins du type 1.2 se situent en position intermédiaire. Le ratio **de dénivelée** (**indice Rr**), proposé par Berger et Entekhabi (2001) matérialise une plus nette distinction entre les bassins du type 2 (valeurs comprises entre 8 et 13) et ceux du type 1, dont l'amplitude entre les valeurs est supérieure à 60. Si la relation est non linéaire, on observe un **effet de taille** pour les bassins du type 2 car les valeurs ont tendance à se stabiliser lorsque la taille des bassins augmente (fig. 5.11b.).

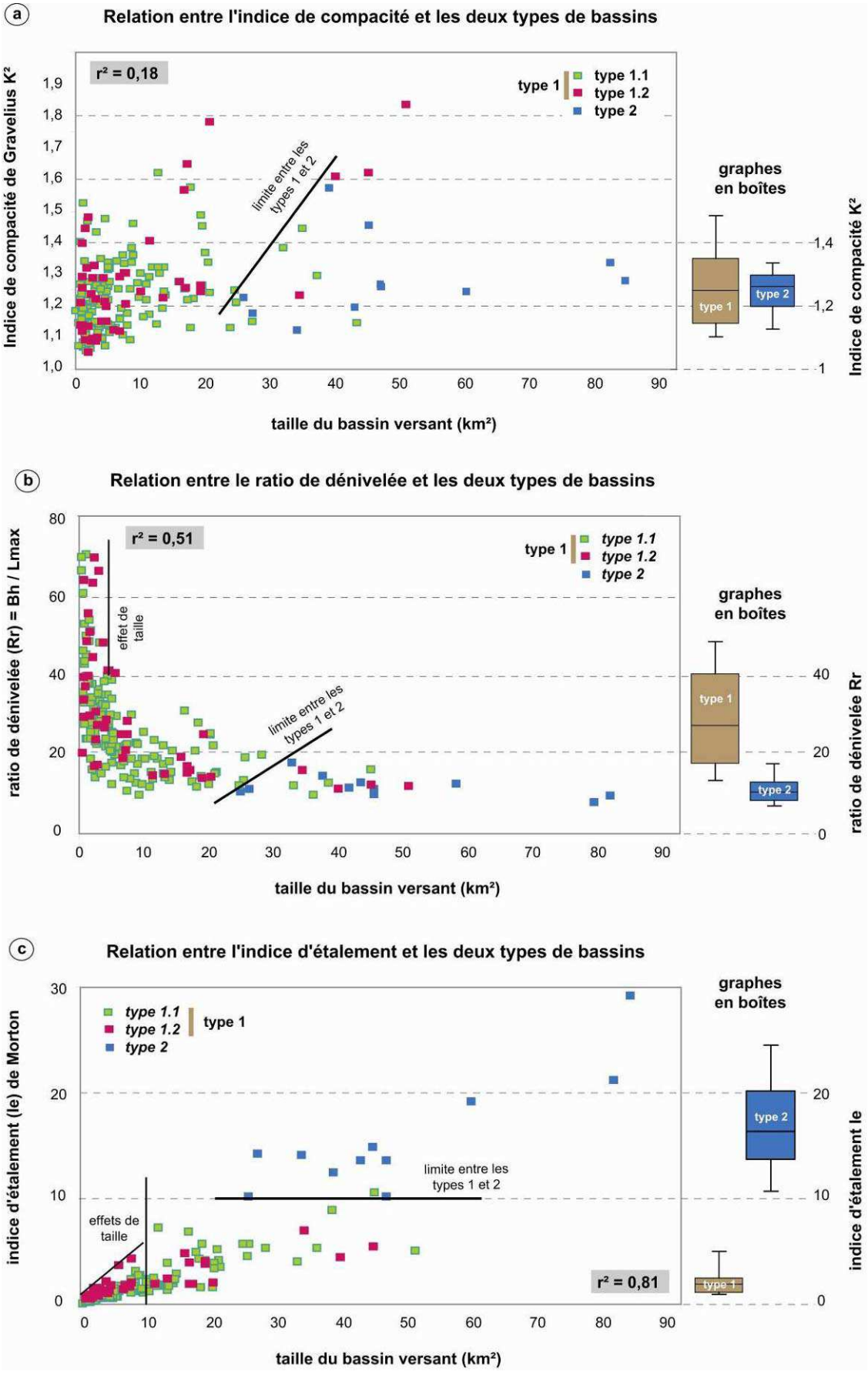


Fig. 5.11. Relations bivariées entre la surface des bassins et trois indices morphométriques.

La **distinction entre les deux types de bassins** est encore plus **flagrante** lorsqu'on étudie l'indice d'étalement de Morton (fig. 5.11c). Plus la valeur de l'indice augmente, plus le réseau divague au sein d'une forme compacte. Les bassins du type 2 ont des indices élevés (> 10) à cause d'une longueur de drain qui est finalement faible vu la taille des bassins (Annexe 5.1.). A l'inverse, les bassins de petite taille (< 10 km²) ont des valeurs inférieures à 5. L'opposition entre les deux types de bassins est marquée lorsque leur taille est comprise entre 20 et 40 km².

L'analyse des relations bivariées affine finalement la caractérisation morphométrique des **deux portraits types** tout en **confirmant leur distinction** par une approche quantitative. Des seuils de sensibilité morphométriques sont également mis en évidence (fortes compacités des bassins, pentes fortes pour ces régions, ratios de dénivelée variés pour les bassins < 5 km²).

5.4. Essai de cartographie des bassins « *sensibles* » (1-10 km²)

A la lecture des résultats précédents, la réalisation d'une carte des bassins sensibles aux « *crues rapides* » en tenant compte de caractéristiques purement morphométriques, est discuté. Un filtre de sensibilité morphométrique est proposé pour les **bassins de moins de 10 km²** ; ces derniers font partie du **type 1** et **ils représentent 70 %de l'échantillon** (soit 132 entités).

Ce travail repose sur l'application de **requêtes spatiales** [1] basées sur des caractéristiques morphométriques précédemment définies. La **première règle** (**A1**) permet de sélectionner les bassins où la dénivelée est supérieure à 75 m **et** où l'indice de compacité K² est inférieur à 1,4. **77 bassins touchés (58 % de l'échantillon) répondent à ces deux critères. La seconde règle** (**A2**) est plus restrictive car elle doit permettre de sélectionner les entités ayant une dénivelée supérieure à 100 m et où l'indice de compacité K² est inférieur à 1,2. Le but recherché ici est de voir si d'autres bassins, *« non touchés »,* présentent ces traits morphométriques spécifiques.

Avant d'appliquer les requêtes spatiales, les bassins de moins de 10 km² ont été délimités automatiquement à partir des Modèles Numériques de Terrain (MNTs). Ce type d'opération a déjà fait l'objet de nombreuses avancées au cours des dernières années. Le module *Spatial Analyst Plus* sur ESRI ® Arc Gis 9.3. a été préféré car il offre l'avantage de scinder le MNT de manière plus précise que les scripts antérieurs (Annexe 5.3.).

Le découpage automatique des bassins crée **2 773** entités spatiales de moins de 10 km² sur les huit départements (fig. 5.12.). Il convient de préciser certaines limites méthodologiques :

- l'algorithme qui sert à découper les bassins versants n'est pas connu ;

- les traitements sont longs et ils ne peuvent être appliqués au-delà de l'échelle régionale ;

- le découpage des bassins versants dans des zones planes ou à faibles pentes peut poser d'importants problèmes (vallée de la Seine, Flandre inférieure) ;

- les bassins situés dans les parties intermédiaires des bassins de grande taille (> 50 km²) correspondent à une association des deux versants qui encadrent une vallée, ce qui n'est pas pertinent d'un point de vue hydrologique ;

- **les entités mal découpées (nord du Pays de Caux, nord du Soissonnais, marais de la Dives) ont été supprimées**, ce qui peut perturber l'interprétation des résultats (fig. 5.12.).

[1] L'application de ces requêtes spatiales, qui reposent sur l'utilisation du langage SQL (« *Structured Query Language »),*doit permettre de sélectionner, de localiser ou de manipuler des objets spatiaux répondant à un ou plusieurs critères.

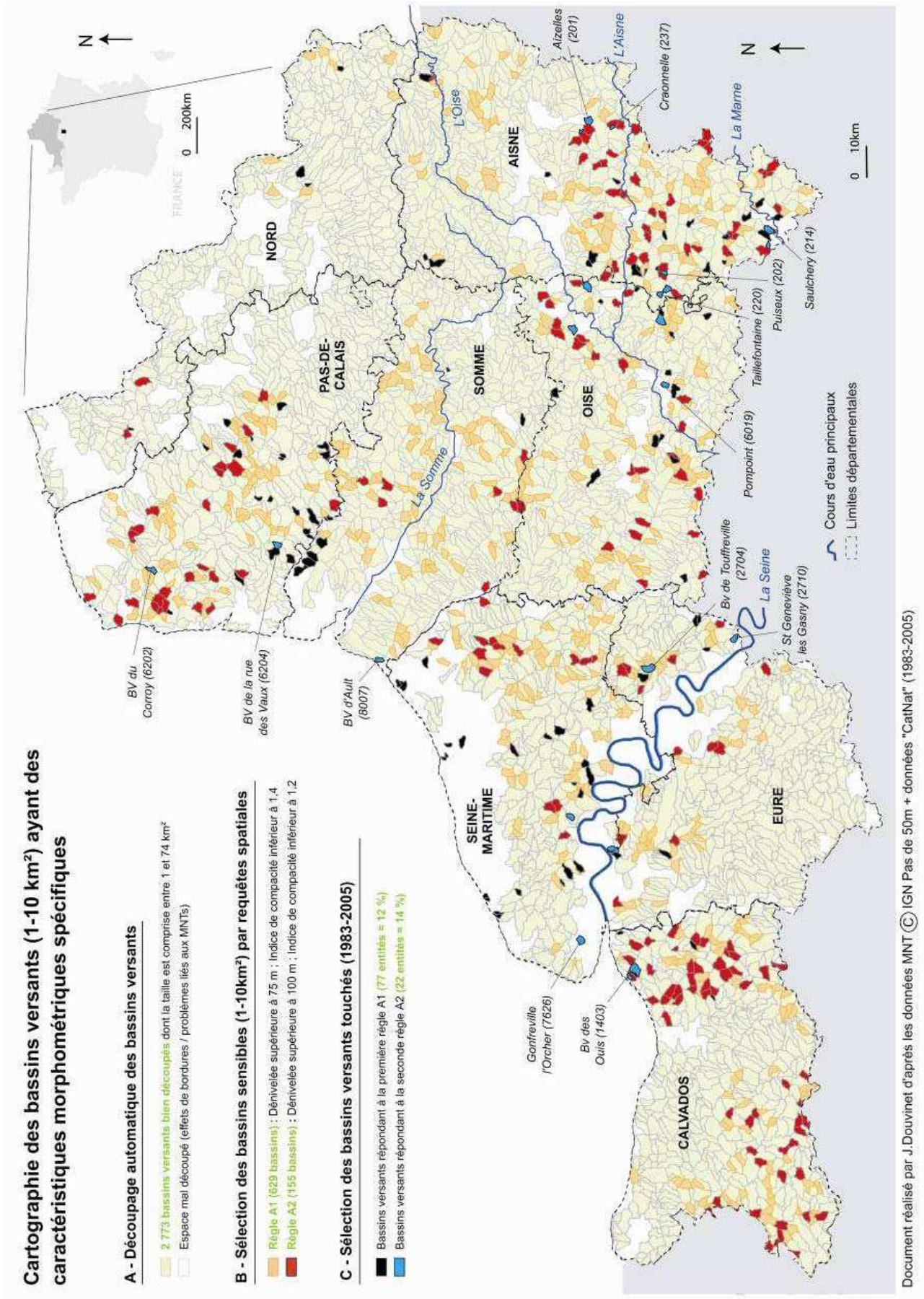


Fig. 5.12. Bassins versants (< 10 km²) ayant des caractéristiques morphométriques spécifiques.

Les requêtes spatiales permettent finalement d'identifier un certain nombre de bassins :
- **629 entités** répondent au premier critère de sélection (**règle A1**). Parmi cet échantillon, **77 bassins (soit 12 %)** ont été recensés dans l'inventaire « *crues rapides* » (1983-2005) ;
- **155 entités** sont sélectionnées par la **règle A2** ; **22 bassins** ont été touchés par des crues.

La cartographie proposée (fig. 5.12.) est intéressante car certains secteurs « *sensibles* » sont ceux qui avaient été précédemment identifiés dans le chapitre 2. Les bassins se situent ainsi dans le Pays de Caux, sur les plateaux à corniche du Soissonnais ou sur les collines du Haut-Pays d'Artois. Les problèmes liés au découpage automatique des bassins versants expliquent la faible part des bassins répondant aux règles A1 et A2 dans le nord du Pays de Caux. **Cette carte confirme surtout l'existence d'un stock de bassins prêts à réagir dans ces différents secteurs.** On observe également une forte sensibilité sur le front de cuesta du Pays d'Auge et sur la boutonnière du Boulonnais. Ces secteurs ont un niveau de sensibilité élevé d'un point de vue morphométrique, mais l'inventaire réalisé à partir des dossiers « *CatNat* » ne les avait pas mis en évidence auparavant (cf. chapitre 2).

Ce résultat amène à poser deux nouvelles questions : les autres variables (l'occupation du sol ou la vulnérabilité des zones bâties par exemple), sont-elles des composantes tout aussi discriminantes ? **Comment expliquer la sensibilité des autres secteurs géographiques (Pays d'Auge, Boulonnais) qui n'avaient pas été identifiés auparavant ?** Afin de répondre à cette seconde question, une discussion est proposée sur les liens entre les espaces urbanisés et les secteurs géomorphologiques identifiés comme « *sensibles* » à l'échelle régionale.

5.5. Discussion

Il ne faut pas oublier que les bassins versants touchés (1983-2005) sur lesquels porte cette étude, ont été recensés à partir d'un **inventaire** des **dommages** associés à des « *crues rapides* ». **Il est alors nécessaire de mieux étudier la distribution spatiale des populations par rapport aux différentes configurations géomorphologiques précédemment mises en avant.**

5.5.1. Zonation des secteurs « *sensibles* » autour des cuestas

Dans un premier temps, la localisation de la population est analysée sur les **fronts et les revers de cuesta**. Dans les séries sédimentaires monoclinales, on peut classer les cours d'eau suivant leur sens d'écoulement par rapport au pendage des couches, et en fonction de leur adaptation, ou non, à la tectonique (Archambault *et al.*, 1989 ; Peulvast et Vanney, 2001) :

- les **rivières cataclinales** s'écoulent dans la direction du pendage ; elles circulent sur le revers d'une cuesta (on les appelle aussi **cours d'eau conséquents**) ou pénètrent dans le revers par un *entonnoir de percée cataclinale* (Coque, 1998). Ces cours d'eau sont souvent temporaires dans leur partie amont car ils prennent leurs sources dans des roches dures. Ils sont adaptés à la tectonique (Chaput, 2005), contrairement aux branches anaclinales ;

- les **rivières anaclinales** s'écoulent dans le sens contraire du pendage, généralement sur le front de cuesta ; on les désigne aussi sous le terme de **cours d'eau obséquents** ;

- les **rivières orthoclinales** (ou **subséquentes**) sont perpendiculaires au pendage, logées au pied du front de cuesta ; elles sont alimentées par les rivières anaclinales (fig. 5.13.).

D'autres rivières ne sont adaptées ni au pendage, ni à la disposition des fronts (Derruau, 1996 ; Archambault *et al.*, 1989), ce qui pose le difficile problème de leur origine. Au cours du temps, une rivière orthoclinale peut aussi capturer une portion de cours cataclinal.

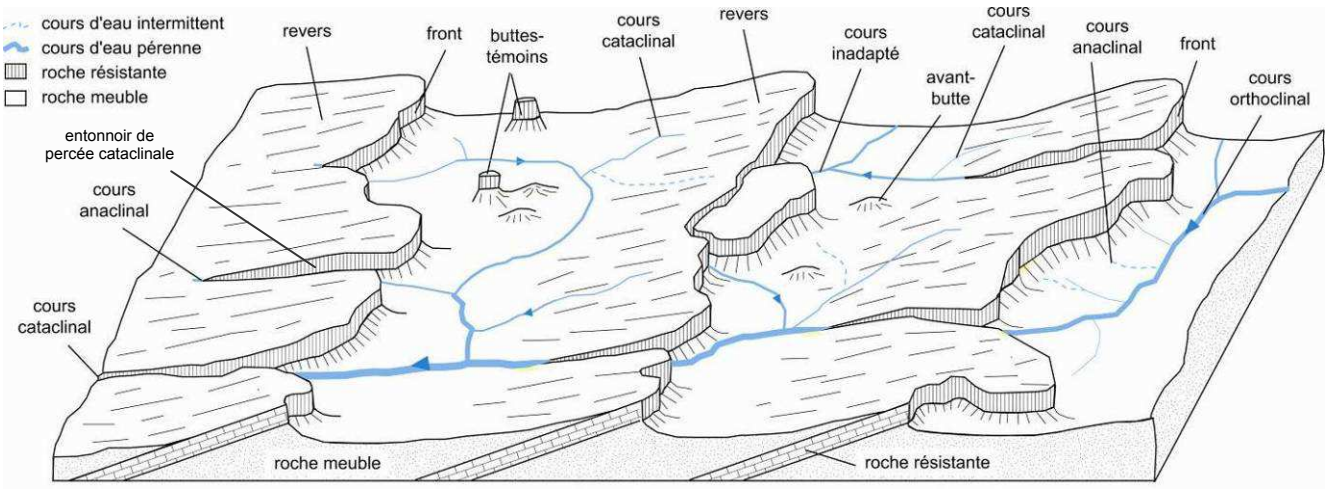


Fig. 5.13. Type de rivières associées aux cuestas (modifié d'après Archambault *et al.*, 1989).

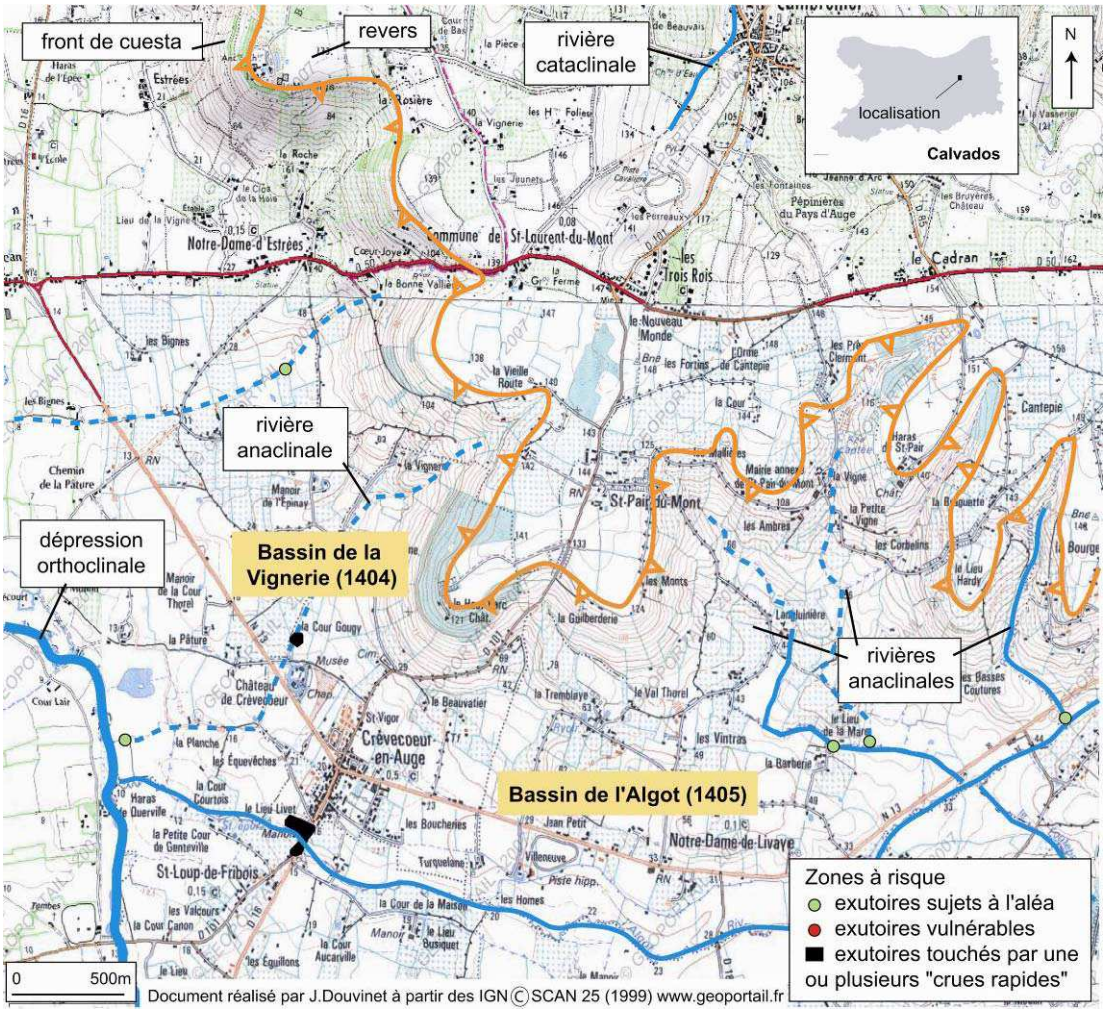


Fig. 5.14. Un risque faible, voire inexistant : exemple choisi sur la cuesta du Pays d'Auge (14).

En lien avec cette typologie des rivières associées à des cuestas, le **risque « *crues rapides* » semble élevé, principalement aux exutoires des rivières cataclinales, et secondairement sur les rivières anaclinales ; il est plus rarement observé au sein des dépressions orthoclinales.** Pour illustrer ce propos, la localisation des espaces urbanisés le long des fronts de cuesta du Pays d'Auge (fig.5.14.) et du Pays de Thelle (fig. 5.15.) est plus finement détaillée.

Les rivières anaclinales sont propices à l'aléa quand elles présentent de fortes pentes et lorsque la taille des bassins est suffisamment importante pour produire des ruissellements en quantité (Pays d'Auge, Soissonnais). L'orientation du front de cuesta peut, dès lors, jouer un rôle primordial. Il peut bloquer les circulations zonales (Pays d'Auge) s'il est exposé à l'ouest, ou bien accentuer la stationnarité des circulations méridiennes et des remontées d'air chaud (Soissonnais). Ce phénomène a déjà été mis en avant pour expliquer la violence des « *orages de retour* » fréquemment observés durant le mois de mai dans l'Aisne (Angeliaume, 1996).

En revanche, **le risque demeure faible** aux exutoires des rivières anaclinales (fig. 5.13.) et les dégâts y sont rarement observés (fig. 5.9). Ce constat peut en partie s'expliquer par :

- **une faible urbanisation** aux exutoires de ces bassins (Pays d'Auge, fig. 5.14.) ;
- **par la petite taille** (< 2 km²) des surfaces amont (Boulonnais, Pays de Thelle, fig. 5.15.) ;
- par l'omniprésence des surfaces boisées (fig. 5.15.) et enherbées (fig. 5.14.) qui peuvent limiter la formation des ruissellements de manière précoce (très tôt en amont).

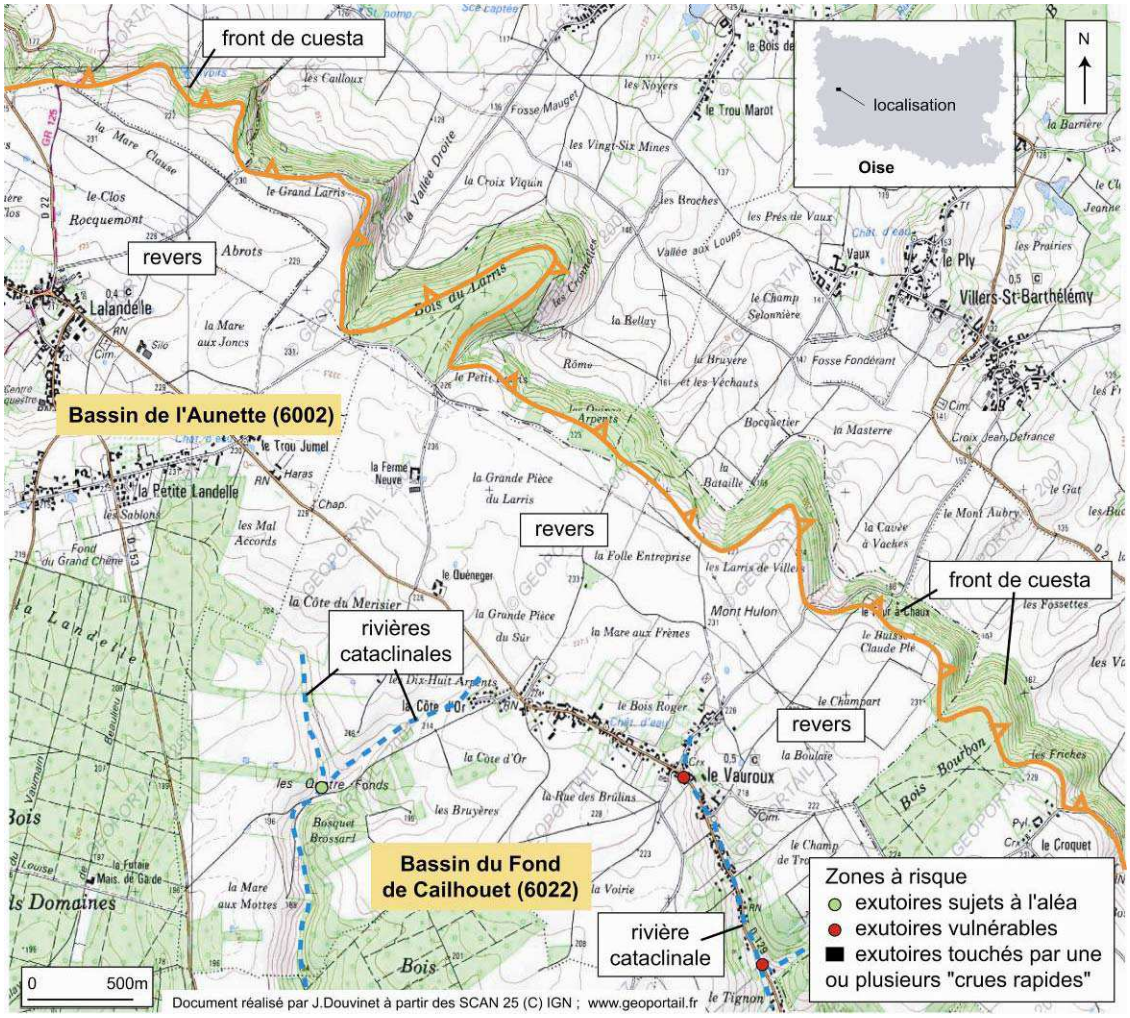


Fig. 5.15. Un risque « *crues rapides* » faible sur le front de cuesta du Pays de Thelle (60).

La population, plus nombreuse, est plus exposée aux exutoires des **rivières cataclinales** qui se situent sur les revers de cuesta (Haut-Pays d'Artois, Pays de Thelle, Soissonnais), ou qui le traversent de part en part (l'Oise, l'Aisne). Le recensement des « *crues rapides* » est à associer à la part importante de l'urbanisation et à des pourcentages de surfaces cultivées qui sont plus élevées en raison de pentes plus douces que sur les fronts de cuesta (fig. 5.15.).

Quant aux **dépressions orthoclinales**, elles sont peu « *sensibles* » à l'aléa « *crues rapides* » *:* ces vallées humides, aux pentes faibles voire nulles, présentent des **profils en travers larges de plusieurs dizaines de kilomètres** (vallées du Thérain, 60 ; de la Dives, 14 ; de l'Ailette, 02) qui tamponnent la réactivité des vallons s'y raccordant. Ces espaces, les plus urbanisés, sont, en revanche, exposés aux crues par débordement ou par remontées de nappes.

5.5.2. Fragmentation du risque dans les plateaux à corniche

Dans un deuxième temps, la distribution spatiale de la population est commentée sur les plateaux à corniche de la Picardie « *picarde* ». **Le risque apparaît fragmenté dans l'espace** car l'implantation humaine est très variable, même entre vallons situés à proximité (fig. 5.16.).

Certains bassins ne sont pas « *à risque* » car ils sont dépourvus de toute urbanisation. Ils sont également majoritairement boisés, et des zones humides dominent le fond du vallon principal, ce qui limite potentiellement l'apparition des ruissellements. En revanche, le risque devient plus élevé lorsque les bassins, urbanisés, se raccordent aux plateaux peu pentus et largement cultivés. Les ruissellements peuvent rapidement se concentrer dans les fonds de vallons, et les dommages peuvent devenir importants, même sur de courtes distances.

Le risque paraît ainsi disparate dans l'espace et des bassins situés à proximité peuvent présenter une sensibilité totalement opposée. L'exemple choisi (fig. 5.16.) oppose des vallons urbanisés, progressivement « *grignotés* » par la pression foncière (Cuffies, Pasly) et situés à proximité des villes importantes (ici, Soissons), et des bassins qui restent épargnés de cette urbanisation, mais qui restent morphométriquement « *sensibles* ». Il n'est pas nécessaire de multiplier les exemples ; de très nombreux secteurs présentent la même caractéristique dans ces régions : Aizelles, Soucy, Craonnelle, Clamecy (à 3 km à l'est), etc.

5.5.3. Concentration du risque dans les vallées encaissées du Pays de Caux

Dans un troisième temps, l'implantation des populations est étudiée dans les fonds de vallée humide du Pays de Caux. Le risque est **élevé** à cause d'une **concentration des enjeux dans des secteurs potentiellement très sensibles à l'aléa** (cf. chapitre 3).

La partie sud du Pays de Caux est d'autant plus vulnérable que bon nombre de vallons présentent de fortes pentes et un encaissement marqué. Toute la partie au sud de la faille, qui segmente le Pays de Caux d'ouest en est (Hauchard *et al.*, 2002b), est affaissée. Alors que l'alimentation des talwegs principaux est souvent réduite dans les autres vallées (fig. 11.9.), les petits drains latéraux sont ici de plus grande taille (< 40 km²) et fortement pentus. L'aléa est potentiellement très virulent, d'autant plus que le fond de vallée est densément peuplé. **Le risque apparaît comme continu sur plusieurs kilomètres de long. L'aléa pluviométrique peut alors faire fonctionner n'importe quel bassin, quelle que soit sa localisation.**

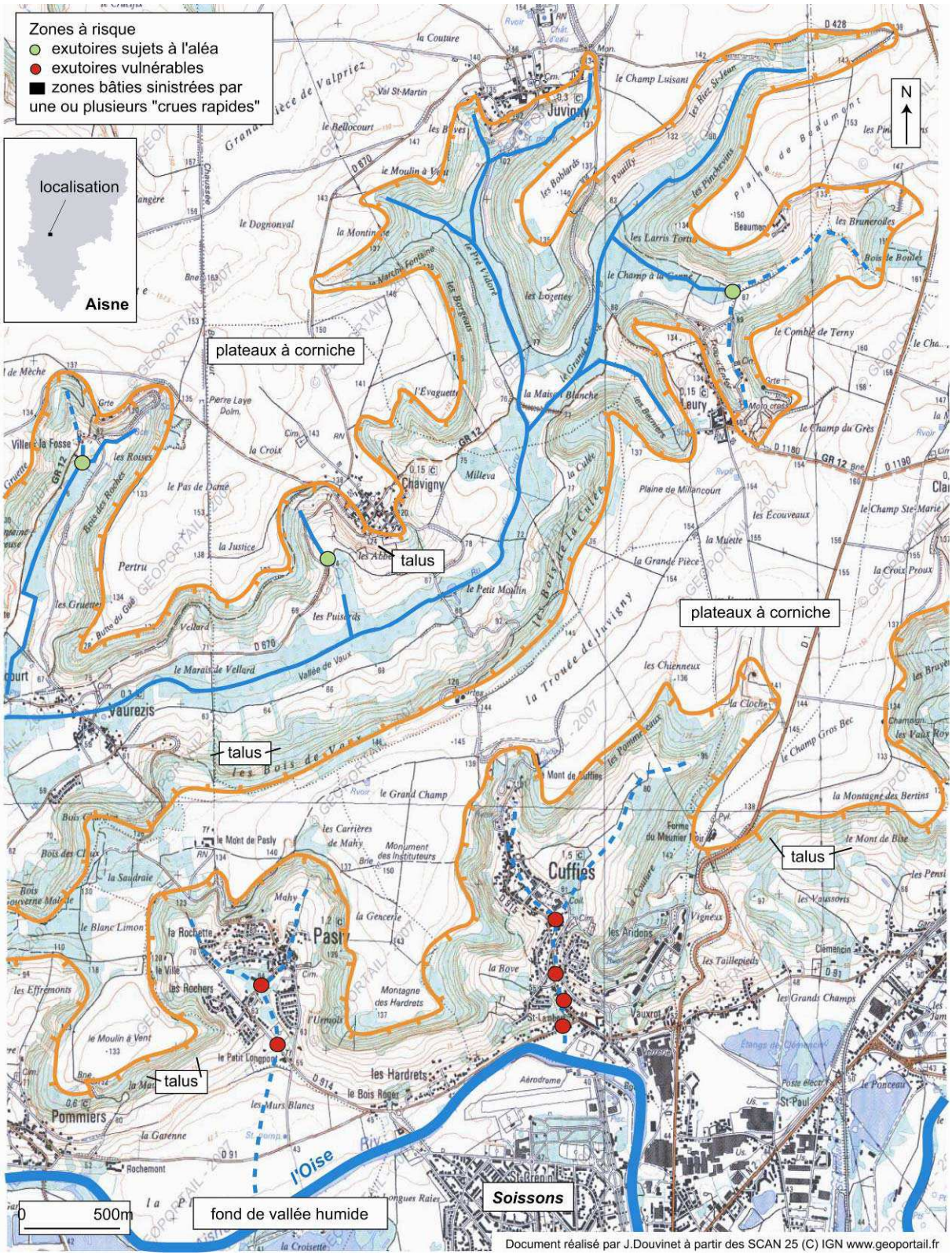


Fig. 5.16. Un risque disparate associé à une urbanisation variable dans les plateaux à corniche : exemple choisi dans la vallée de l'Aisne (02).

La partie basse de la vallée de l'Austreberthe témoigne de cette forte sensibilité (fig. 5.17.). Les vallons St Paer, Villers-Ecalles, Villers et Barentin ont déjà fonctionné une voire plusieurs fois. Le fait que ces bassins soient nombreux, dans un espace restreint et densément peuplé,

explique sans doute la raison pour laquelle la Seine-Maritime est la plus sensible aux « *crues rapides* » et que l'ampleur des dégâts devient parfois « *dramatiques* » (cf. chapitre 3).

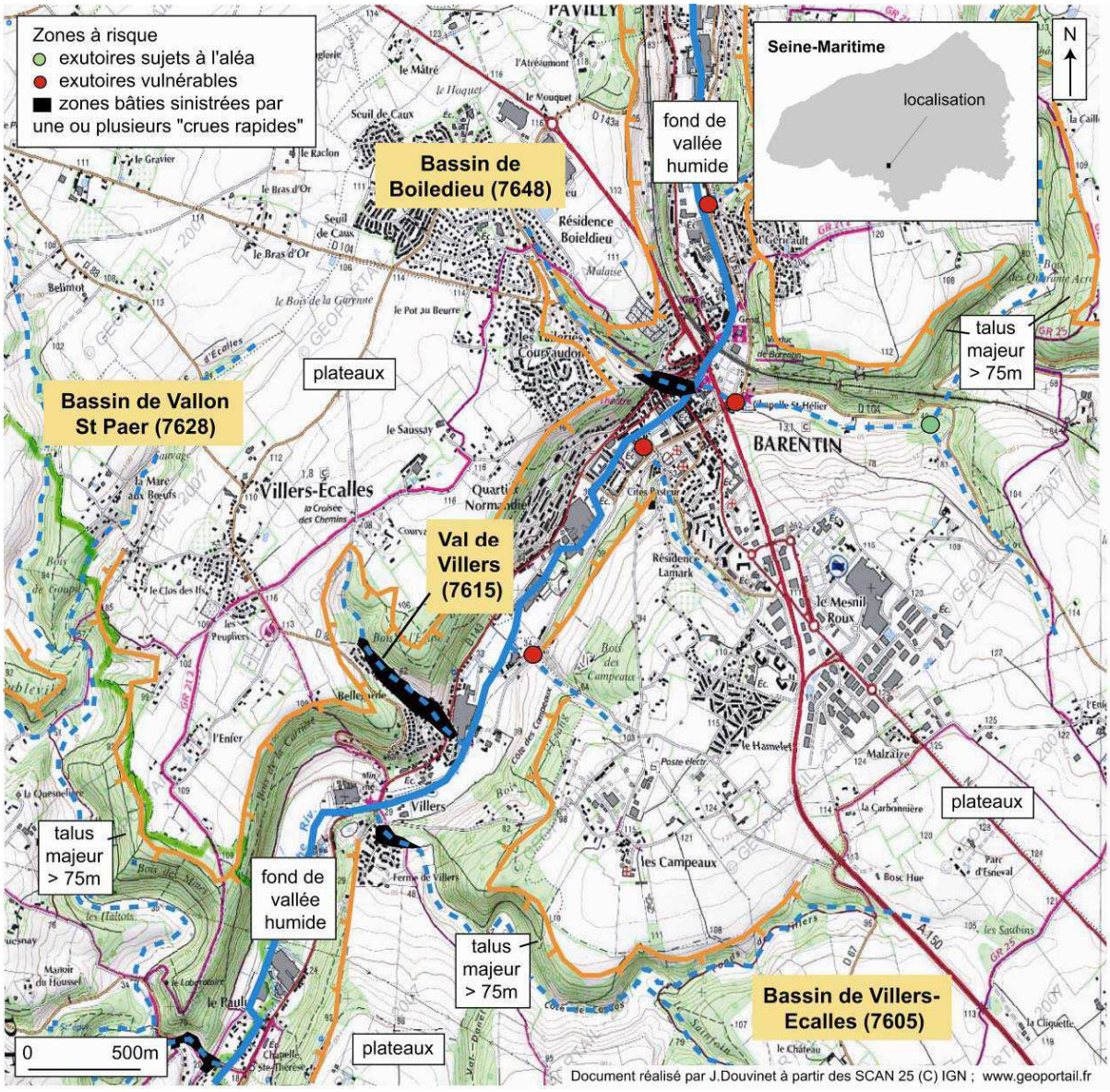


Fig. 5.17. Un risque élevé associé à une urbanisation intense dans un fond de vallée encaissée : l'exemple de la partie basse de l'Austreberthe (76).

Ces différents exemples montrent finalement que les caractéristiques géomorphologiques définissent des **secteurs « *à risque* ».** Si on veut mieux comprendre la localisation des bassins identifiés à partir des dossiers « *CatNat* », il est nécessaire d'y associer les espaces urbanisés.

Conclusions du chapitre 5

L'analyse des **caractéristiques morphologiques** des bassins versants touchés (1983 -2005) a permis d'améliorer les connaissances sur la **sensibilité des bassins touchés par des « *crues rapides* ».** On peut également répondre aux quatre questions initiales.

► Le portrait type défini par D. Delahaye (2002) en Seine-Maritime est-il transposable sur l'ensemble des 189 bassins versants touchés ?

La réponse est à nuancer. Il n'y a pas un, mais deux portraits types qui se distinguent :

Le premier type est défini à partir de critères **morphologiques**. Les bassins sont de petite taille (< 40 km²) et à fortes pentes. Ce groupe est **majoritaire** puisqu'il rassemble **178 bassins,** soit près de 94 % de l'échantillon**.** Deux sous types se distinguent : les vallons situés en aval de grands bassins versants (**128 bassins, soit 72 %**), et ceux qui sont associés aux principaux éléments structurants du Bassin Parisien (**50 bassins, soit 28 %**) tels que les fronts et revers de cuesta, les buttes résiduelles, les plateaux à corniche… Ces bassins sont **immatures** d'un point de vue géomorphologique : les profils en long sont encaissés et resserrés, ce qui traduit un degré de régularisation relativement jeune entre les talwegs et les niveaux de base.

Le second type est tributaire de critères purement morphométriques (11 bassins) : les bassins sont de grande taille (20-85 km²) et assez compacts. Ils se démarquent par des écarts-types de pentes faibles et par un étalement plus prononcé que les autres bassins. **Les indices morphométriques confirment leur originalité.** Ces bassins, situés en amont de plus grands bassins, ont un encaissement régulier qui traduit une plus grande maturité.

► Peut-on mettre en évidence des critères de sensibilité morphométriques ?

L'approche quantitative met en évidence plusieurs **seuils de sensibilité.** La plupart des bassins ont une forte compacité ($K^2 < 1,4$) ; 70 % des bassins recensés font moins de 10 km² et la dénivelée est supérieure à 75 m pour 82 % des bassins. L'analyse des relations bivariées entre plusieurs indices confirme l'opposition entre les deux portraits types. Néanmoins, il est impossible de proposer une **typologie** à partir des indices morphométriques car ces derniers sont trop dépendants les uns des autres (Annexe 5.2.).

► Les « *crues rapides* » apparaissent-elles plus fréquemment dans certains secteurs qui présentent des configurations morphologiques privilégiées ?

La cartographie réalisée à l'aide de plusieurs requêtes morphométriques montre que des bassins « *non touchés* » présentent les mêmes caractéristiques que les 189 bassins recensés. Ce résultat signifie que **la morphologie est, comme la pluie, une condition nécessaire mais pas suffisante** pour expliquer la sensibilité des bassins étudiés. La morphologie régionale définit néanmoins un stock de bassins prêts à fonctionner, et c'est bien un facteur de prédisposition majeur pour expliquer le fonctionnement des « *crues rapides* ».

► Est-il finalement possible de dresser une cartographie des espaces « *sensibles* » en se basant uniquement sur la morphométrie ?

Si elle a un rôle primordial, la composante morphologique ne suffit pas à expliquer, à elle seule, la distribution spatiale des bassins versants touchés. Une lecture **géomorphologique** à méso échelle, en lien avec la distribution des espaces urbanisés, permet de voir que la place des enjeux, et plus largement des surfaces urbanisées par rapport aux axes d'écoulement, est un facteur de discrimination majeur. **Il ne faut pas oublier que les 189 bassins touchés, sur lesquels porte cette étude comparative, ont été identifiés à partir d'un recensement des dommages liés aux « *crues rapides* » et déclarés dans le cadre de la procédure « *CatNat* ».** Ce constat replace au premier plan la sensibilité de l'espace, et oriente la problématique vers l'analyse de l'occupation du sol.

Chapitre 6

Influence de l'occupation du sol sur la sensibilité des bassins touchés par des « *crues rapides* »

Introduction	**p. 158**
6.1. Caractéristiques du contexte agricole régional	**p. 159**
6.2. Sensibilité à l'aléa érosion des sols	**p. 167**
6.3. Examen des statistiques locales	**p. 169**
6.4. Etudes de cas à l'échelle évènementielle	**p. 176**
Conclusions du chapitre 6	**p. 183**

Estreux (59) – 07 juin 2007
Cliché : J.Douvinet

Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la variable occupation du sol, dans sa globalité, mais aussi à son **organisation interne** au sein des 189 bassins versants recensés. Les observations réalisées à la suite de plusieurs catastrophes montrent que la relation entre l'occupation du sol et les « *crues rapides* » est plus complexe qu'il y paraît. Certes, certaines crues ont été observées sur des bassins fortement cultivés : Estreux (59), Vendeuvre (14), Ault (80), mais des événements sont également apparus sur des bassins où les surfaces à forte capacité d'infiltration sont majoritaires : St-Martin-de-Boscherville (76), Hautot sur Mer (76), etc. (Delahaye *et al*., 2007a).

Plusieurs travaux ont parallèlement souligné le rôle joué par l'organisation spatiale des surfaces sensibles sur la production du ruissellement érosif (Papy et Douyer, 1988 ; Papy *et al*, 1988 ; Derancourt, 1995). Un bassin versant présentant de nombreuses surfaces cultivées agrégées, sans surface d'infiltration interstitielle, constitue un système potentiellement très sensible. Une occupation du sol mieux distribuée, alternant des surfaces ruisselantes et des zones de réinfiltration, garantit au contraire une meilleure protection face à l'érosion des sols.

Ce chapitre a, dès lors, pour objet de répondre aux questions suivantes :

► **les crues sont-elles plus souvent recensées dans certains secteurs géographiques ?** Afin de répondre à cette question, il s'avère nécessaire de présenter l'occupation du sol, l'utilisation qui en est faite et la sensibilité à l'érosion sur les huit départements étudiés.

► **l'apparition des « *crues rapides* » est-elle liée à un pourcentage minimum de terres cultivées ?** Si **oui**, la sensibilité des bassins est tributaire de ces surfaces. Si **non,** comment expliquer la diversité de l'occupation du sol sur les 189 bassins recensés ?

► **la localisation des terres cultivées, boisées et enherbées, est-elle plus discriminante que les pourcentages mesurés à l'échelle globale des bassins versants ?**

► **la structure interne d'un bassin conditionne-t-elle l'organisation de son occupation du sol ?** Sans exagérer tout déterminisme, plusieurs travaux ont déjà mis en avant cette influence en Seine-Maritime (Hauchard, 2001 ; Delahaye, 2002). Le chapitre 5 a également mis en évidence l'existence de deux portraits types distincts. L'opposition entre les deux types de bassins « *sensibles* » se retrouve-t-elle aussi dans les modes d'occupation du sol ?

► **la sensibilité de l'occupation du sol est-elle minorée ou aggravée par l'influence des autres composantes géographiques locales (pluie et morphologie) ?**

La démarche proposée ici repose sur une approche à trois niveaux : à l'**échelle régionale,** une analyse descriptive du contexte agricole (§ 6.1.), puis une étude de la sensibilité à l'aléa érosion des sols (§ 6.2.) ; à l'**échelle locale**, un examen des « *occupations du sol moyennes* » sur les 189 bassins versants recensés et l'étude des liens qui existent avec la morphologie (§ 6.3.) ; à l'**échelle événementielle**, une confrontation de la composante occupation du sol avec les données pluviométriques et morphologiques (§ 6.4.) est proposée à travers divers exemples.

Cette approche doit permettre de **mettre en évidence le poids de l'organisation spatiale de l'occupation du sol** sur la sensibilité, étudiée à différentes échelles, des bassins versants touchés. **Elle doit aussi apporter des éléments de réponse sur la place de cette variable par rapport aux deux autres composantes précédemment étudiées.**

6.1. Caractéristiques du contexte agricole régional

L'objet de cette section est de présenter, sur les huit départements étudiés, l'**occupation du sol,** qui recouvre l'aspect biophysique de la surface à un **instant *t*,** mais aussi l'**utilisation du sol,** *« qui fait référence aux usages et aux pratiques agricoles et qui s'applique aux fonctionnalités économiques et sociales »* (Hubert-Moy *et al.*, 2001 ; Corgne, 2005). Une comparaison des cartes obtenues à échelle régionale par rapport à la localisation des bassins touchés (1983-2005) doit permettre de savoir si certaines régions agricoles sont plus touchées que d'autres.

6.1.1. Données utilisées

Dans un premier temps, la base de données *Corine Land Cover* a été utilisée. Lancé en 1985 par la Commission Européenne, le projet *Corine Land Cover (Co-ordination of Information on the Environment)* a permis de cartographier l'occupation du sol (1985-1995 ; 1995-2000) sur tous les pays de l'Union Européenne (Puissant, 2003). Cette base de données, réalisée à l'échelle du 1/100 000ème, avec une nomenclature en 3 niveaux et 44 classes, est **gratuite** et **facilement utilisable car mise à disposition au format SIG.** Elle a été récemment remise à jour (en 2003) à partir d'images satellitaires de l'année 2000. La comparaison est possible avec les premières cartes réalisées pour l'année 1990 (www.ifen.fr).

D'autres bases de données existent (Annexe 6.1.) mais elles sont **coûteuses car produites à la demande** : on peut citer, entre autres, la BD CARTO, réalisée à l'échelle du 1/50 000ème, ou la base de données SPOT Théma qui existe pour toutes les agglomérations au 1/10 000ème. La télédétection aurait également pu être utilisée pour étudier les changements d'occupation du sol à échelle fine (Puech, 2000 ; Tolle, 2006 ; Germaine *et al.*, 2007 ; Le Cerf, 2008).

Dans un second temps, les données du Recensement Général Agricole (RGA) ont permis d'affiner la présentation du contexte agricole régional en étudiant **les pratiques agricoles et les combinaisons d'usages du sol**. Si ces données font référence à l'utilisation du sol, on les considère plutôt comme témoins d'une situation donnée à un instant *t*, et donc plutôt comme de l'occupation du sol. La base de données fournit des informations importantes, à la fois sur les **types de cultures** (terres cultivées en blé, orge, colza, etc.) et sur **la conduite des surfaces fourragères** (surfaces occupées par le maïs fourrage ; la prairie temporaire ; les STH, Surfaces Toujours en Herbe). De nombreuses cartes sont produites à partir de ces données agrégées qui sont mobilisables à différents échelons, dont le plus fin est celui de la commune (Marie *et al.*, 2008). L'utilisation des données RGA permet de mesurer l'impact des activités agricoles sur la structuration de l'espace (Bermond, 2004).

6.1.2. Structuration spatiale de l'occupation du sol

A l'échelle régionale, les régions du nord de la France se caractérisent par une **mosaïque** d'espaces agricoles **variés** (fig. 6.2). La répartition des surfaces cultivées, enherbées et boisées est fortement liée aux variations morphologiques et lithologiques régionales (Delahaye, 2002). Les seules véritables ruptures dans le paysage sont marquées par les principales vallées des cours d'eau, aux ordres 4 et plus si on se réfère à la classification de Strahler (Seine, Marne). Elles sont délimitées par les principaux ensembles morpho-tectoniques (cf. chapitre 5).

Ces régions correspondent majoritairement à des espaces de grande culture. Les plateaux tertiaires (Tardenois, Valois, Soissonnais), surmontés de buttes et fortement compartimentés, sont couverts par des campagnes ouvertes et par de vastes espaces de forêts (Compiègne, Senlis, Villers-Cotterêts). Au nord, les plaines et les collines de craie abritent des openfields sur limons (Santerre, Vermandois, Laonnois). Des espaces herbagers et des zones de bocage affleurent sur les limites du socle paléozoïque à l'ouest (le Bocage Virois, le Bessin) et à l'est (la Thiérarche) de la zone d'étude. Des espaces herbagers s'individualisent aussi dans le Pays d'Auge, associé à la cuesta éponyme, et au sein des boutonnières du Boulonnais, du Pays de Bray et de la Thiérache, bien visibles à cette échelle large (fig. 6.2.). Les bordures et revers des fronts de cuesta sont très boisés et ils présentent des pentes fortes (> 15%).

6.1.3. Distribution des 189 bassins versants touchés

Les 189 bassins versants touchés se dispersent dans **33 Petites Régions Agricoles** (PRAs). Loin devant les autres, le Pays de Caux est bien la région la plus sensible aux phénomènes de « *crues rapides* » (fig. 6.1.) ; 36 bassins versants y sont recensés. Suivent ensuite le Soissonnais (18 bassins), le Ternois (17), le Tardenois et Brie (14) et le Pays de Montreuil (13). Les bassins touchés sont plus souvent situés dans des **contextes agricoles dominés par les cultures** (102 bassins ; **54** %) ou dans des **contextes mixtes** alliant terres cultivées et prairies permanentes (57 bassins ; **30** %), mais plus **rarement** dans des espaces très cultivés tels que le Laonnois, le Santerre, le Marquenterre ou le Saint-Quentinois (18 bassins ; 9,5 %) ou, au contraire, très herbagers comme le Pays d'Auge, la Thiérarche ou le Boulonnais (12 bassins, 6%). Le Plateau de Neubourg, dominé par des espaces de grande taille, largement cultivés et orientés vers un système de polyculture-élevage (tab. 6.1.) n'a jamais été touché par des « *crues rapides* ».

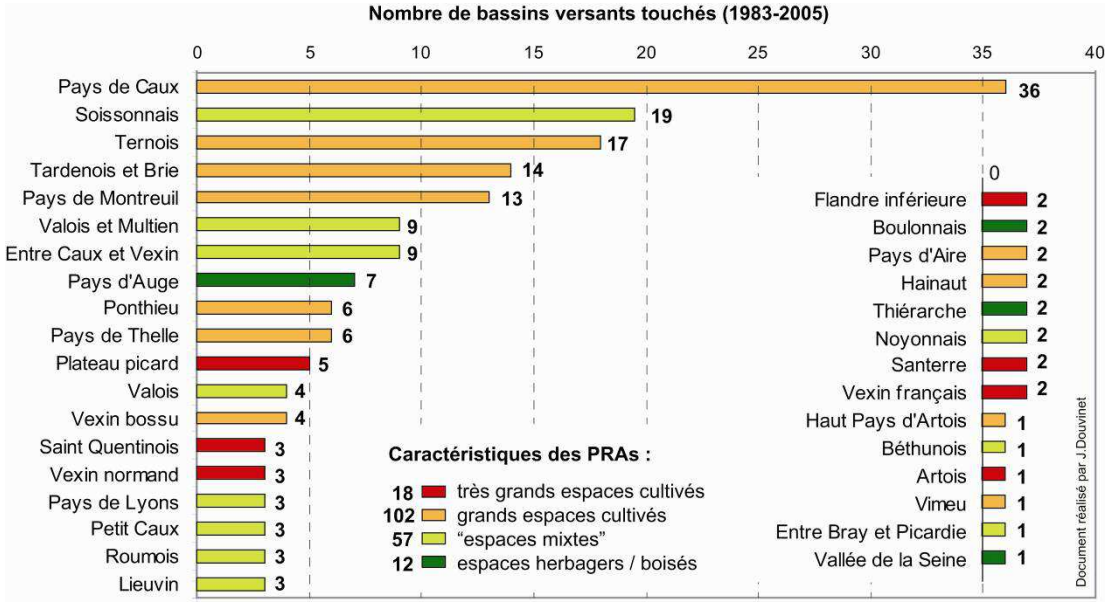


Fig. 6.1. Dispersion des 189 bassins versants dans des contextes agricoles variés.

L'analyse reste **délicate** car le découpage des PRAs n'est plus cohérent aujourd'hui. En effet, les profondes mutations techniques et économiques (spécialisation, intensification) ont radicalement transformé les systèmes agricoles régionaux depuis la création des PRAs en 1946 (Marie *et al.*, 2008). Etudier les données du RGA en complément est alors nécessaire.

Fig. 6.2. Distribution spatiale de l'occupation du sol à échelle régionale

6.1.4. Etude des usages du sol

L'analyse de l'occupation du sol n'est pas réellement dissociable de l'utilisation qui en est faite par l'agriculteur. *« Les changements d'occupation du sol peuvent être subtils tant dans le changement lui-même que dans le rythme de cette évolution »* (Corgne, 2004). *« Les changements d'usage du sol sont complexes car les types, l'ampleur et les rythmes de ces changements, et les causes qui les provoquent, sont variables suivant les occupations du sol et les régions »* (Houet, 2006).

L'agriculture et l'industrie agro-alimentaire structurent fortement ces régions, tant sur le plan de l'**organisation spatiale** des structures agricoles que sur le plan de **l'économie** (Marie, 2006). L'agriculteur adopte un **type de production** (élevage bovin, porcin, cultures…) qu'il associe à un **mode** de **production** qu'il conduit de manière plus ou moins intensive. Il définit ensuite un assolement et une répartition annuelle des différents types d'occupations des sols afin d'assurer la production nécessaire au fonctionnement de son exploitation. L'analyse de ces relations peut se faire de plusieurs manières, dont la plus commune est le **recours aux statistiques agricoles** (Mignolet, 1992 ; Marie *et al.*, 2008).

Les données du **Recensement Général Agricole** (RGA) doivent affiner la présentation du contexte agricole régional en étudiant les pratiques agricoles et les combinaisons d'usages du sol. Afin de répondre à la problématique de cette étude, **onze variables** ont été sélectionnées. Les céréales d'hiver ou de printemps (blé, orge, maïs-grain) et les cultures industrielles (colza, betteraves) ont été rapportées à la surface totale occupée par les terres labourables (STL) ; les Surfaces Toujours en Herbes (STH) et le maïs-fourrager (MFE) ont été rapportés aux Surfaces Fourragères Principales (SFP) ; la surface moyenne des exploitations (SME) et le pourcentage de la STH/SAU (Surface Agricole Utile) ont également été ajoutées (fig. 6.3.).

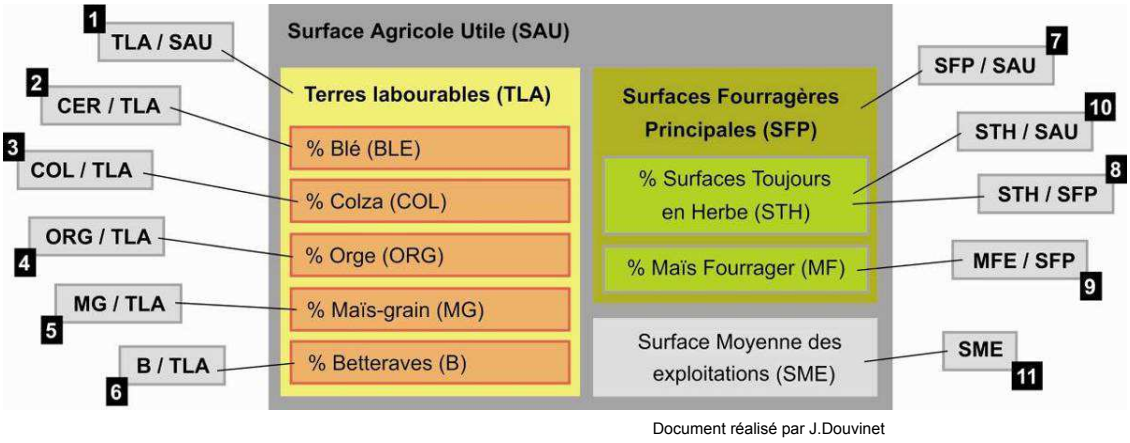


Fig. 6.3. Les 11 variables sélectionnées à partir des statistiques agricoles du RGA.

La démarche retenue repose ensuite sur l'utilisation de **techniques d'analyse multivariée associées à la cartographie**, notamment sur le binôme *Analyse en Composantes Principales (*ACP) et *Classification Ascendante Hiérarchique* (CAH). Ces traitements sont de plus en plus fréquemment utilisés pour **créer des indices synthétiques** à partir de données obtenues sous SIG (Liébault *et al.*, 2002 ; Shary *et al.*, 2002 ; Grohmann, 2004).

Le croisement de ces données doit permettre de **faire ressortir des groupes d'individus sur les 5 545 communes** des huit départements étudiés (Annexe 6.2.).

L'ACP fournit de nouvelles variables non corrélés entre elles. L'axe (**F1**) explique 30 % de la variance ; celui-ci oppose les communes où les terres labourables (STL) représentent plus de 60 % de la Surface Agricole Utile, et les communes où les Surfaces Fourragères Principales (SFP) sont importantes, avec logiquement, une part élevée de Surfaces Toujours en Herbe (STH) dans la SAU. L'axe (**F2**) explique 16 % de la variance. Il oppose les communes où la part des surfaces en blé et en orge au sein des terres labourables est forte, et celles où ces surfaces sont faibles. Ces deux premiers axes expliquent 46 % de la variance. Le troisième axe (**F3**) explique 11 % de la variance. Il oppose les communes où les surfaces cultivées en maïs-fourrage ont une part importante, et les communes où les parcelles en maïs-grain sont bien représentées. L'interprétation de l'axe F4 et des axes suivants est **délicate** car le pourcentage de variance expliquée est inférieur à la variance moyenne de chaque variable (tab. 6.1.).

	F1	F2	F3	F4
TLA/SAU	**19,224**	3,074	2,616	2,865
CER/TLA	1,159	**36,973**	0,046	0,756
ORG/TLA	3,139	**19,290**	10,827	3,924
Mgr/TLA	0,039	3,849	**29,728**	2,231
colza/TLA	0,562	**23,217**	0,596	1,676
BET/LAB	0,322	2,823	0,589	**85,400**
SFP/SAU	**26,962**	0,927	0,133	0,090
STH/SAU	**26,647**	1,165	1,019	0,047
STH/SFP	9,319	3,416	5,646	1,603
MFE/SFP	1,843	0,255	**47,362**	1,353
SME	10,784	5,011	1,438	0,055
Variabilité (%)	29,574	16,061	11,128	8,978
Variabilité cumulée (%)	29,574	45,635	56,763	65,741

Tab. 6.1. Contribution des variables suivant les % de variabilité des 4 premiers axes factoriels.

Une CAH a ensuite été appliquée sur le tableau des coordonnées prises par les individus (communes) sur les huit axes factoriels. Il s'agit de regrouper les individus selon leur degré de ressemblance pour former des groupes les plus homogènes possibles (Annexe 6.2.). Une partition en 14 classes est la plus significative. Une nuée dynamique a été appliquée afin de minimiser l'inertie intra-classe tout en augmentant l'inertie inter-classe (Bermond, 2004). Une **typologie en 9 classes et en 3 grands types** semble finalement la plus pertinente (fig. 6.4) :

Type A : systèmes céréaliers dont une part importante des terres labourables est destinée au blé, orge et maïs-grain. Le plateau de Saint André est révélateur du premier sous-type (**type A1**) avec près de 68 % de céréales dont 59 % pour le blé (BLE/TLA). La part de la STH/SAU est en moyenne de 5,4 %, et en corollaire, la surface moyenne des exploitations (SME) est supérieure à 110 ha. Le **type A2** regroupe des communes où, en moyenne, les terres labourables (TLA/SAU) représentent plus de 91 % de la SAU, avec près de 54 % de céréales et une proportion élevée de betteraves (B/STL) arrivant à 12 %. La Champagne crayeuse et toute la partie sud-est de la zone d'étude est concernée par ce deuxième type. Le **type A3**, dont le Pays d'Ouche est le plus représentatif, est marqué par une présence plus élevée de la STH (21,3 % en moyenne par rapport à la SAU) et des taux de céréales qui restent à 73 % parmi les terres labourables.

Type B : systèmes tournés vers la combinaison polyculture–élevage. Dans le **type B1**, la part des céréales est de 49 % en moyenne, et 35 % des Surfaces Fourragères Principales sont en mais-fourrage. La Flandre inférieure est caractéristique de ce type B1. Le **type B2** regroupe des exploitations agricoles situées sur des zones de reliefs prononcés : l'Artois,

Fig. 6.4. Structuration de l'espace agricole et localisation des bassins touchés (1983-2005)

la partie nord du Pays de Caux, la marge occidentale de la Thiérarche (fig. 6.4.). Le **type B2** illustre une conduite peu intensive des surfaces fourragères. La part des SFP/SAU est de 41 %, avec 67 % de STH. Le Boulonnais est révélateur du troisième sous-type (**type B3**), avec 61 % de SFP/SAU et surtout un pourcentage de terres labourables moins élevé.

Type C : systèmes d'élevage où les différences se font par rapport au **type de production** (extensif ou intensif). La part des surfaces fourragères (SFP/SAU) devient de plus en plus importante. Les Surfaces Toujours en Herbe passent progressivement de 40 % de la SAU, en moyenne, pour le **type C1,** à 65 % pour le **type C2,** puis 85 % pour le **type C3**. Les surfaces fourragères (56 % de la SAU) et les surfaces cultivées (34 %) sont élevées pour le premier sous-type (C1). Le Bocage Virois, le nord du Lieuvin et la partie sud du Pays de Caux se retrouvent associés dans ce type C1. Ces résultats sont identiques à ceux obtenus à l'échelle cantonale par M. Bermond (2004). Le **type C2** est très bocager (Bessin, Pays de Bray, Pays d'Auge), avec peu de céréales (5 % de la SAU en moyenne). Le **type C3** reste exclusivement destiné à l'élevage ; la Thiérarche est facilement identifiée (fig. 6.4.).

Cette typologie dresse finalement une synthèse des combinaisons des usages du sol et la structure de l'espace agricole devient plus facile à interpréter. La comparaison avec la carte des 189 bassins versants touchés montre que **les vallons sont dispersés** dans :

- des systèmes d'élevage intensif [type C1] (sud du Pays de Caux) ;
- des systèmes de polyculture-élevage [type B2] (Haut-Pays d'Artois, Pays de Caux) ;
- des systèmes céréaliers [type A2] (Soissonnais, Valois).

Certaines régions semblent plus fréquemment touchées et pourtant, aucune prévalence ne se dégage à l'échelle régionale. Afin d'affiner les caractéristiques régionales de ces espaces, la sensibilité des sols à l'aléa érosion a également été étudiée.

6.2. Sensibilité à l'aléa érosion des sols

L'objectif de cette section est de comparer la sensibilité à l'érosion des sols des différentes régions, de **dégager des grandes tendances**, et non pas d'évaluer l'influence de ce paramètre qui a fait l'objet de nombreuses recherches à échelle fine (CAR de la Canche et de l'Authie, 1978 ; Bolline, 1982; Boiffin *et al*., 1988 ; Ludwig, 1992 ; Angeliaume *et al*., 1994 ; Cerdan, 1997 ; Le Bissonnais *et al*., 2002 ; Joannon, 2004…).

Une cartographie a déjà été proposée par l'IFEN (Institut Français de l'Environnement) et l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) à l'échelle nationale. « *Les documents cartographiques présentés n'ont pas vocation à être agrandis ou analysés au niveau local. Ils ne peuvent fournir que des indications de tendance pour des portions de territoire de l'ordre de quelques dizaines de km²* » (Le Bissonnais *et al*, 2002). La méthode (une classification hiérarchique) et les données utilisées pour la réalisation de cette carte sont rappelées en Annexe 6.3.

Cinq classes expriment la sensibilité « *agro-pédo-géomorphologique* » potentielle de chaque maille (Le Bissonnais *et al*., 2002), **en allant de très faible à très fort**. Ces résultats ont ensuite été intégrés selon différentes *Unités Spatiales d'Intégration* (USI). Les données ont été mises à disposition pour les départements étudiés suite à une convention signée avec J. Darroussin (INRA, Orléans). Seule la carte obtenue pour les cantons à l'échelle annuelle est commentée ici (fig. 5.6.). Les cartes saisonnières (printemps, été) ont été ajoutées en annexe 6.4.

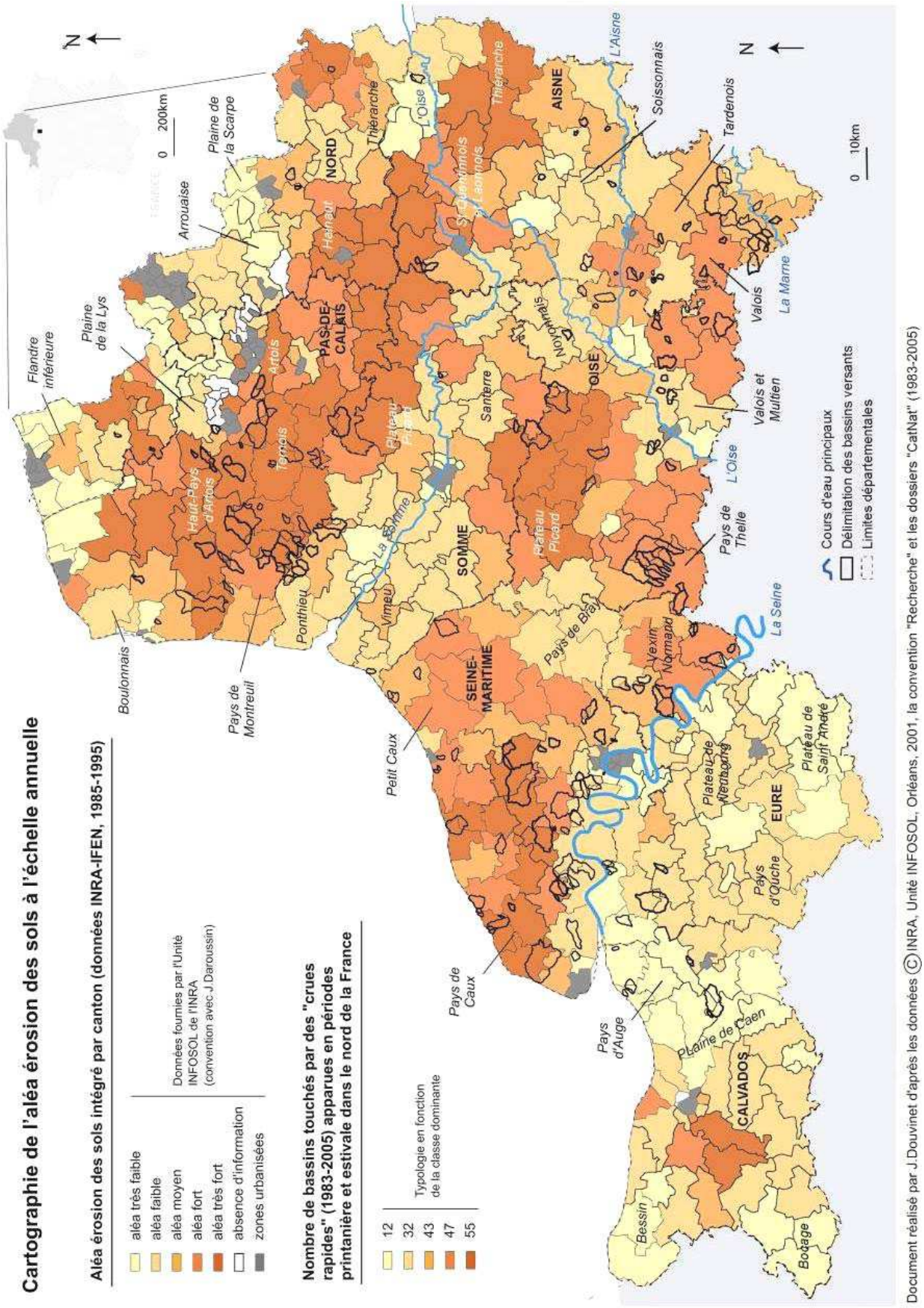


Fig. 6.5. Cartographie de l'aléa érosion des sols à l'échelle annuelle sur les huit départements (d'après les données © INRA Infosol, 2001).

Les régions Haute-Normandie, Nord-Pas-de-Calais et Picardie, sont concernées par l'aléa **durant n'importe quelle saison**. *« Dans l'ensemble, l'aléa fort correspond aux terrains très arrosés et limoneux en bordure du littoral, ou aux pentes plus prononcées, comme sur les collines de l'Artois »* remarquent Y. Le Bissonnais *et al*. (2002). La confrontation avec la distribution spatiale des 189 bassins touchés montre que **la majorité des bassins se situe dans des cantons à forte, voire très forte sensibilité à l'érosion des sols. Associées, ces deux classes sont dominantes dans 102 bassins, soit 54 % des entités étudiées**. **L'aléa moyen est au minimum présent sur 145 entités, soit 77 % de l'échantillon.** Des secteurs sensibles à l'aléa érosif durant l'hiver, et en particulier les plateaux du Santerre, le Nord de l'Ile de France (Vexin), le Hainault, ne sont, en revanche, jamais touchés par des crues printanières et estivale.

Les **cartes saisonnières** (Annexe 6.4.) mettent à jour **une sensibilité moins élevée** durant le printemps et l'été. Ces résultats sont surprenants, mais ils sont à associer aux paramètres pris en compte pour définir cette sensibilité à une échelle saisonnière. *« L'aléa climatique a été intégré par la fréquence moyenne des hauteurs de pluies supérieures à 15 mm en 1h pour les saisons printanières et estivales »* (Le Bissonnais *et al.,* 2002). Les pluies à l'origine des *« crues rapides »* sont plus *« extrêmes »*. Ce manque de correspondance ne signifie pas l'absence de sensibilité à l'aléa érosion durant ces périodes, surtout qu'à l'échelle annuelle, la relation est confirmée.

A la lecture des résultats obtenus à une échelle régionale, il est ensuite proposé de mieux aborder la sensibilité de l'occupation du sol à l'échelle des bassins versants. **On propose de comparer les occupations du sol moyennes sur les 189 bassins recensés, tout en gardant à l'esprit les deux portraits types morphologiques différenciés dans le chapitre 5.**

6.3. Examen des statistiques locales

6.3.1. Choix et limites des données

On s'intéresse à la **distribution spatiale des différents éléments du paysage** au sein des bassins touchés. Les valeurs statistiques obtenues à partir des données *Corine Land Cover* ont été vérifiées puis confrontées avec les photos aériennes et les orthophotoplans. Cette étude se heurte rapidement à plusieurs problèmes :

- la base de données *Corine* décrit l'occupation du sol à un instant donné qui ne traduit pas les états des occupations du sol au moment où les crues ont été observées (1983-2005). L'occupation du sol réellement observée au moment de la crue n'est disponible que pour quelques bassins (période 2005-2007) et pour ceux qui ont fait l'objet d'études spécifiques (Hay, 1998 ; Vandewiele, 1998 ; Ingetec, 2001 ; Hydratec, 1999, 2001a ; Delahaye, 2002 ; Stefanescu, 2003 ; Hay-Lepêtre, 2005), soit **17 bassins** (9 % de l'échantillon). Si les images satellitales (Spot, Ikonos) auraient probablement permis d'affiner les valeurs statistiques, elles se seraient heurtées au même problème ;

- les cultures printanières, potentiellement les plus sensibles, notamment au mois de mai, ne sont pas individualisées dans la nomenclature de la base de données *Corine Land Cover*. Elles ne seront donc pas dissociées des autres types de cultures ;

- la base des données *Corine Land Cover* est souvent réservée à l'échelle régionale car elle présente des erreurs à grande échelle (Tolle, 2006), surtout pour des surfaces inférieures à 25 ha. Les écarts peuvent potentiellement être importants pour des petits bassins.

La **fiabilité des données** ***Corine Land Cover*** a été testée sur un bassin versant de 4,1km² (Annexe 6.5). Les surfaces urbanisées, enherbées et boisées, estimées à partir de cette base de données, donnent des résultats assez proches de celles évaluées à partir des orthophotoplans (2001) et des observations de terrain (2006). Les prairies ont tendance à être sous-estimées par rapport aux terres cultivées car les prairies temporaires sont incluses dans l'item « *cultures* ».

C'est en ayant connaissance de ces contraintes et ces limites d'utilisation que cette étude a été menée. Une comparaison entre l'**occupation du sol moyenne** mesurée sur des bassins de taille différente doit permettre de quantifier **l'hétérogénéité statistique** entre les individus. On cherche ensuite à vérifier si l'apparition des crues est liée à un **pourcentage minimum** de surfaces cultivées, boisées et enherbées, et si l'organisation spatiale de l'occupation du sol est conditionnée par la variable morphologique dont l'influence a déjà été mise en avant.

6.3.2. Disparité des occupations du sol moyennes

Dans un premier temps, l'étude porte sur l'occupation du sol de **15 bassins touchés** pris aléatoirement, et dont la taille est inférieure à 40 km² (tab. 6.2.). Les bassins de petite taille ont des écarts allant de 1 à 54 % pour les surfaces boisées, de 16 à 52 % pour les prairies, et de 6 à 55 % pour les cultures. Les surfaces urbanisées ont des valeurs variables (entre 15 et 26 %).

Si aucune prévalence ne se dégage sur les petits bassins, des tendances apparaissent au fur et à mesure que la taille du bassin s'accroît. La part des surfaces urbanisées diminue avec des valeurs qui deviennent inférieures à 10% pour des bassins de plus de 25 km². La part des prairies et des bois est très hétérogène, les écarts allant de 8 à 34 % pour les surfaces boisées et de 3 à 57 % pour les surfaces enherbées. En revanche, la part des cultures est supérieure à 20 % sur les bassins de plus de 20 km² (fig. 6.6.) : 26 % sur le bassin du Sébec (45 km²) ; 57 % sur le bassin d'Essômes (21 km²), et même 63 % sur le bassin de la Ravine (33 km²).

Les occupations du sol moyennes peuvent aussi être identiques pour des bassins de taille différente. On peut citer, par exemple, le Vallon du Fond Gomare (4,8 km²) et le bassin de la Ravine (33 km²) qui ont 15 % de prairies et plus de 50 % de cultures (tab. 6.2.).

Nom du bassin (Dépt.)	% bois	% prairies	% cultures	% urbain	surface (km²)	H (Shannon)
Val d'Hautot sur Mer (76)	8	52	14	26	1,14	1,167
Bv de Pourville (76)	54	16	6	24	1,39	1,137
Callenvile (14)	10	66	6	17	2,13	0,956
Val de Rouxmesnil (76)	3	37	37	23	2,44	1,179
Bv du Mesnil-Val (76)	1	29	55	15	2,76	1,018
Bv d'Ault (80)	2	19	62	17	3,35	0,991
Bv du ravin (27)	30	23	32	15	3,78	1,348
Vallon du Fond Gomare (76)	26	15	50	9	4,86	1,198
St Philbert sur Risle (27)	20	26	41	13	5,49	1,299
Bv du Val St Martin (27)	34	11	52	3	12,5	1,054
Bv de St Martin de B. (76)	17	45	22	16	14,2	1,286
Bv de Villers-Ecalles (76)	9	24	53	14	14,48	1,170
Essômes (02)	29	3	57	11	21,11	1,027
Bv de la Ravine (27)	19	15	63	3	33,62	0,996
Bv du Sébec (27)	8	57	26	7	45,38	1,058
Ecarts sur 15 bassins	1 - 54	3 - 57	6 - 63	3 - 26	1,1 - 45,3	0,991 - 1,348

Document réalisé par J.Douvinet

Tab. 6.2. Occupation du sol sur 15 bassins versants classés par ordre croissant de taille.

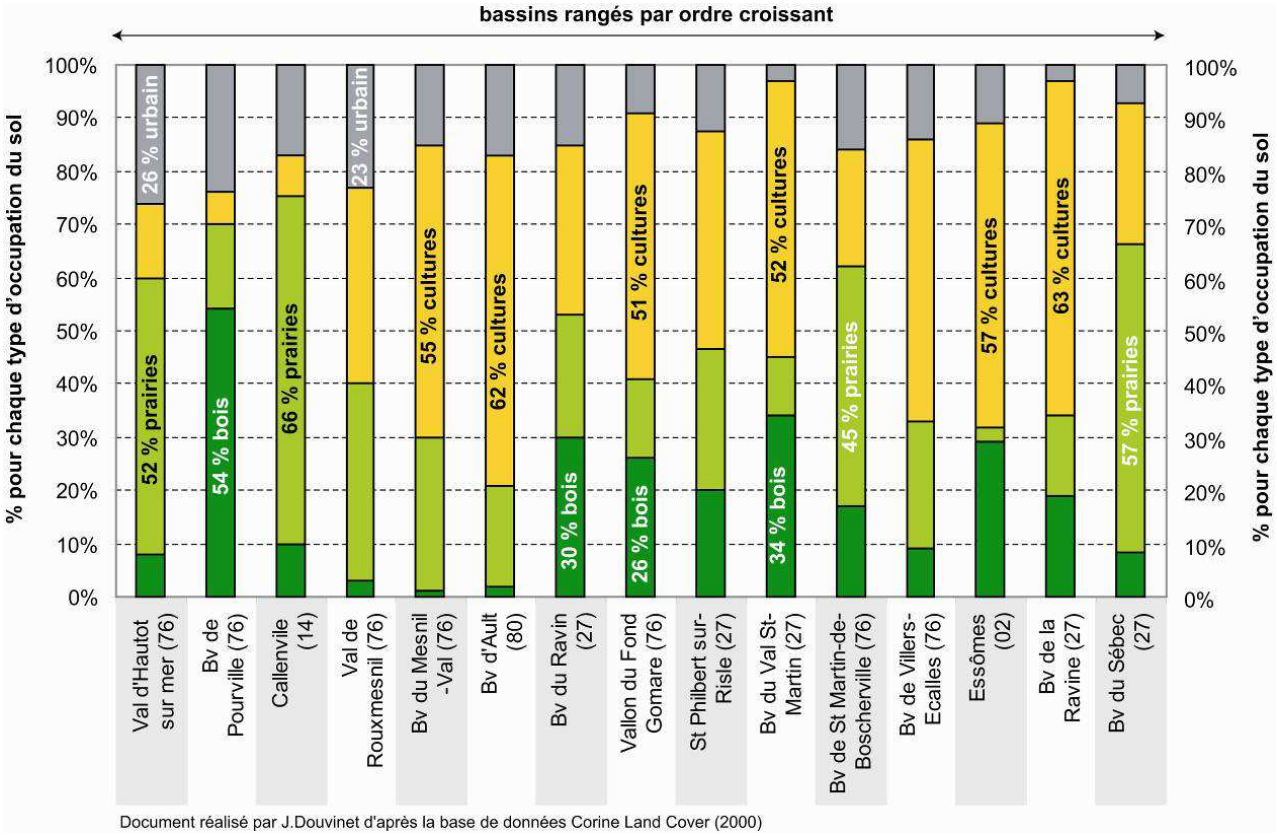


Fig. 6.6. Graphique illustrant cette variabilité de l'occupation du sol sur les 15 bassins étudiés.

L'hétérogénéité entre les occupations du sol a été évaluée à partir d'**indices de diversité** du paysage souvent utilisés par les écologues (Burel et Baudry, 2001). Ces indices ont pour but de mesurer l'entropie associée à la partition et de souligner des équilibres ou au contraire, des déséquilibres entre les classes. Ils permettent aussi de mesurer l'hétérogénéité statistique entre les individus. Plusieurs indices existent, mais il est inutile de tous les calculer car ils sont fortement corrélés entre eux (Loubier, 2001 ; Bocco *et al.*, 2002). L'**Indice de Shannon** (ou **Indice H**) est le plus simple. Il combine le poids de l'abondance relative des différents modes d'occupation du sol (Pi) par rapport à la somme des surfaces de toutes les classes :

$$H = - \sum (Pi \, . \, Ln \, Pi)$$

Dans le cadre d'**une répartition uniforme** des types d'occupation du sol (si chaque classe représente 25% de la surface), la **diversité maximum** *(Hmax)* serait de 1,38. Une distribution égale ou équitable représente une plus grande diversité. Le bassin du Ravin a la plus grande diversité avec un indice H de 1,348. En revanche, plus les valeurs diminuent, plus les classes ont des écarts importants, et plus une classe prédomine (tab. 6.2).

Ce travail confirme que l'hétérogénéité, variable pour les bassins de petite taille, tend à se **stabiliser** pour les bassins supérieurs à 20 km². La part des surfaces cultivées ou enherbées a ainsi progressivement plus d'importance par rapport aux zones urbanisées et boisées lorsque la taille du bassin augmente. La morphologie aurait, dans ce cas-là, un rôle important sur la structuration spatiale de l'occupation du sol, ce qui **amène à comparer l'occupation du sol sur les deux portraits types morphologiques mis en avant dans le chapitre 5.**

6.3.3. Relations entre l'occupation du sol et la morphologie

Plusieurs travaux ont montré que la répartition des composantes essentielles du paysage, que sont les surfaces cultivées, boisées et enherbées, est souvent tributaire de la morphologie à l'échelle des bassins versants (Boiffin *et al*, 1998 ; Blanchard *et al*., 1999 ; Delahaye, 2002). L'organisation de l'occupation du sol est ainsi contrôlée par la **structure interne d'un bassin versant**, qui possède toujours une zone de production des écoulements (un *impluvium*), une zone de transfert, plus encaissée (fig. 6.7.) aboutissant à un exutoire également appelé la zone de sédimentation (Schumm, 1957 ; Piégay et Schumm, 2003).

De manière classique, les parties amont (zones de plateaux) sont occupées par les terres cultivées (sols sur limons). Elles s'opposent à des zones encaissées à fortes pentes présentant des sols boisés de faible épaisseur (rendosols, rankosols). Les prairies ont un positionnement moins bien défini car elles se rencontrent en position de rebord de plateau, sur des pentes intermédiaires, comprises entre 5 et 7 %, ou sont agglomérées autour des fermes [des clos-masures] et, dans ce cas-là, la position topographique est plus aléatoire (Delahaye, 2002). Il suffit de choisir un petit vallon situé dans le Pays de Caux pour illustrer ce propos (fig. 6.7.).

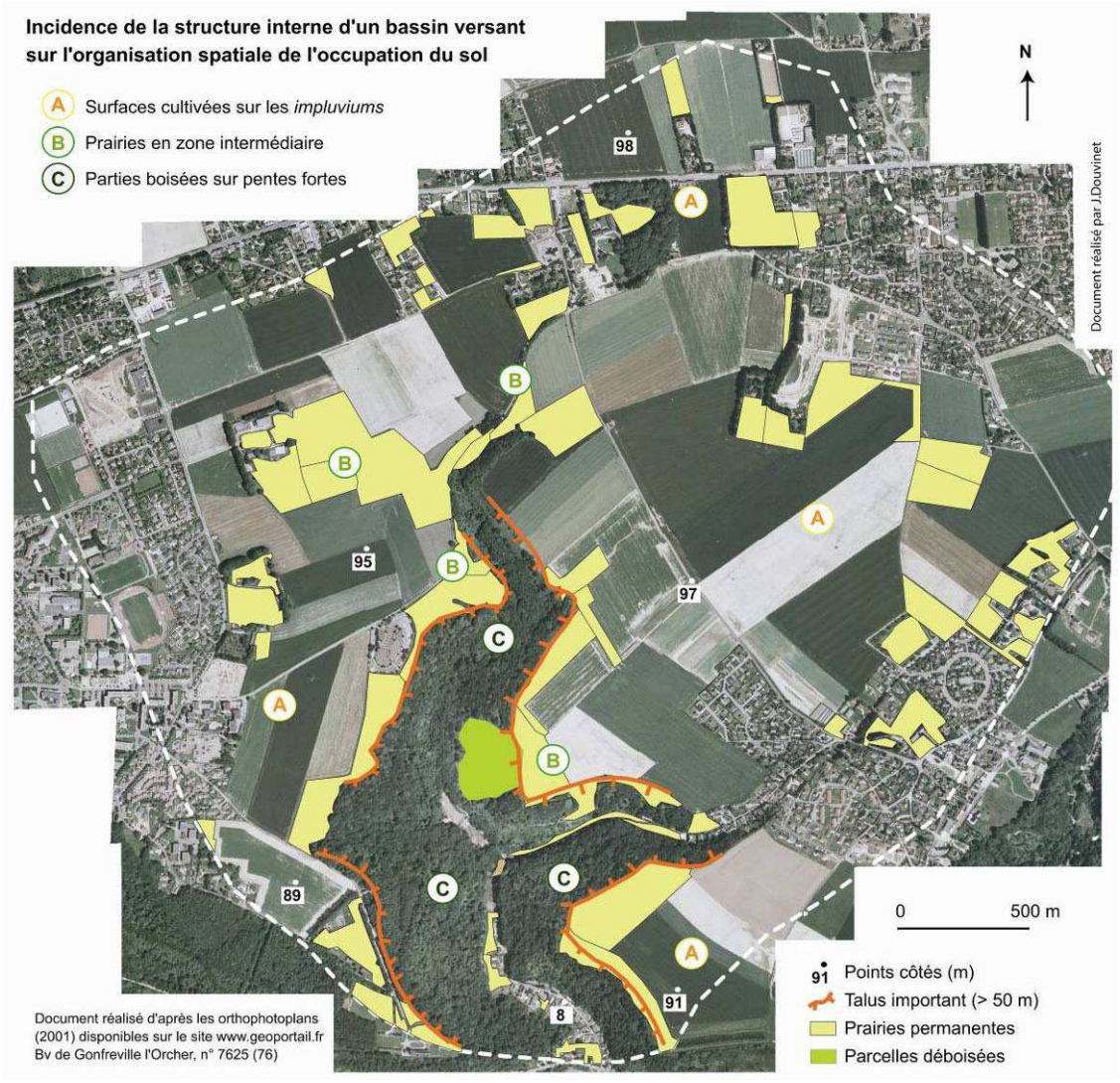


Fig. 6.7. Liens entre la structure d'un bassin et l'organisation spatiale de son occupation du sol.

Cette morphologie est **adimensionnelle** car elle se reproduit quelle que soit la taille du bassin. **Son rôle peut toutefois varier dans l'espace :** une plus grande dissection du relief se traduit par un morcellement accru des différents éléments du paysage, avec une extension des zones boisées et/ou en prairies permanentes au détriment des terres cultivées (Hauchard *et al.*, 2002). En fonction du positionnement morphologique du bassin, la structuration de l'occupation du sol ne sera donc pas la même.

Le chapitre 5 a mis en évidence **deux portraits types morphologiques distincts** ; on peut reprendre cette typologie et voir si le schéma classique se vérifie.

L'occupation du sol des bassins du **Type 1** (178 bassins, soit 94 % de l'échantillon) est très **diversifiée**. Elle est bornée par trois situations extrêmes. Soit les bassins, qui se raccordent le plus en aval possible de plus grands bassins (**Type 1.1**), ont des pourcentages de surfaces boisées et enherbées très élevés. Soit les bassins se raccordent sur de vastes zones cultivées sur les plateaux ; ils sont alors très cultivés. **Bon nombre de bassins se situent en position intermédiaire entre ces trois pôles extrêmes**. Les bassins localisés sur des particularités géomorphologiques (**Type 1.2**) ont aussi des taux de surfaces cultivées ou boisées importants. On peut prendre l'exemple des bassins versants situés sur des buttes témoins, sur lesquels des sols à la fois pauvres et sableux se sont développés, ce qui peut expliquer l'omniprésence des surfaces boisées sur ces entités. Les bassins du type 1.2 sont rarement observés dans des contextes herbagers, à l'exception des deux bassins (fig. 6.8a.) situés sur le front de cuesta du Pays d'Auge, et dont l'orientation économique est avant tout portée vers l'élevage.

L'occupation du sol des bassins du **type 2** est, en revanche, plus homogène. Ces bassins sont majoritairement cultivés, et les surfaces boisées et/ou enherbées deviennent largement minoritaires (fig. 6.8b.). A l'exception du bassin de l'Ordrimouille (02), les bois sont toujours inférieurs à 17 % sur ces 11 bassins et la part des surfaces infiltrantes dépasse rarement les 40 %. **La plus forte proportion de pentes faibles semble plus favorable au développement de vastes surfaces cultivées.**

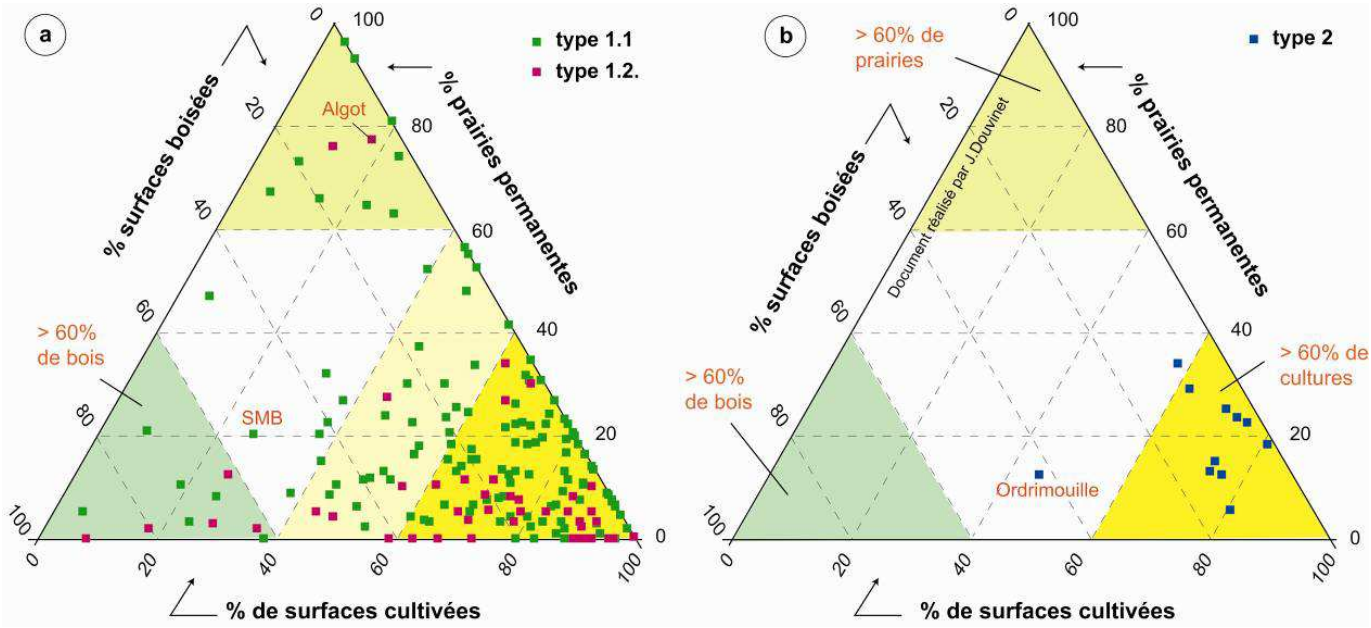


Fig. 6.8. Lien entre la morphologie et les pourcentages de surfaces boisées, enherbés et cultivées sur les bassins versants touchés par des « *crues rapides* » : **a)** type 1 ; **b)** type 2.

La stabilité des valeurs pour les bassins du **Type 2** met finalement en avant un **premier contrôle morphologique**. Pour les bassins du type 1, de plus petite taille, l'occupation du sol est très variable et cette disparité ne fait que s'accroître en allant vers les bassins élémentaires (Hauchard *et al.*, 2002). Les terres cultivées peuvent couvrir de 0 à 100 % de la surface totale des bassins. La notion d'occupation du sol moyenne n'est alors pas appropriée pour étudier la sensibilité de ces bassins. **Plus que la part de chaque type d'occupation du sol à l'échelle globale, c'est désormais leur place au sein des bassins versants qu'il faut appréhender.**

Si quelques bassins se singularisent nettement de l'échantillon, avec des pourcentages qui se démarquent des valeurs moyennes (le Sébec, l'Algot et l'Ordrimouille), **ce travail permet, parallèlement, de mettre en évidence plusieurs critères de sensibilité** (fig. 6.9.) :

- 84 % des bassins ont plus de 40 % de surfaces cultivées (fig. 6.8.), ce qui est néanmoins faible pour des bassins situés dans des régions de grande culture ;
- la part des terres cultivées tend à se stabiliser vers 60-80 % lorsque le bassin s'accroît ;
- les surfaces enherbées sont inférieures à 40 % pour des bassins de plus de 5 km² ;

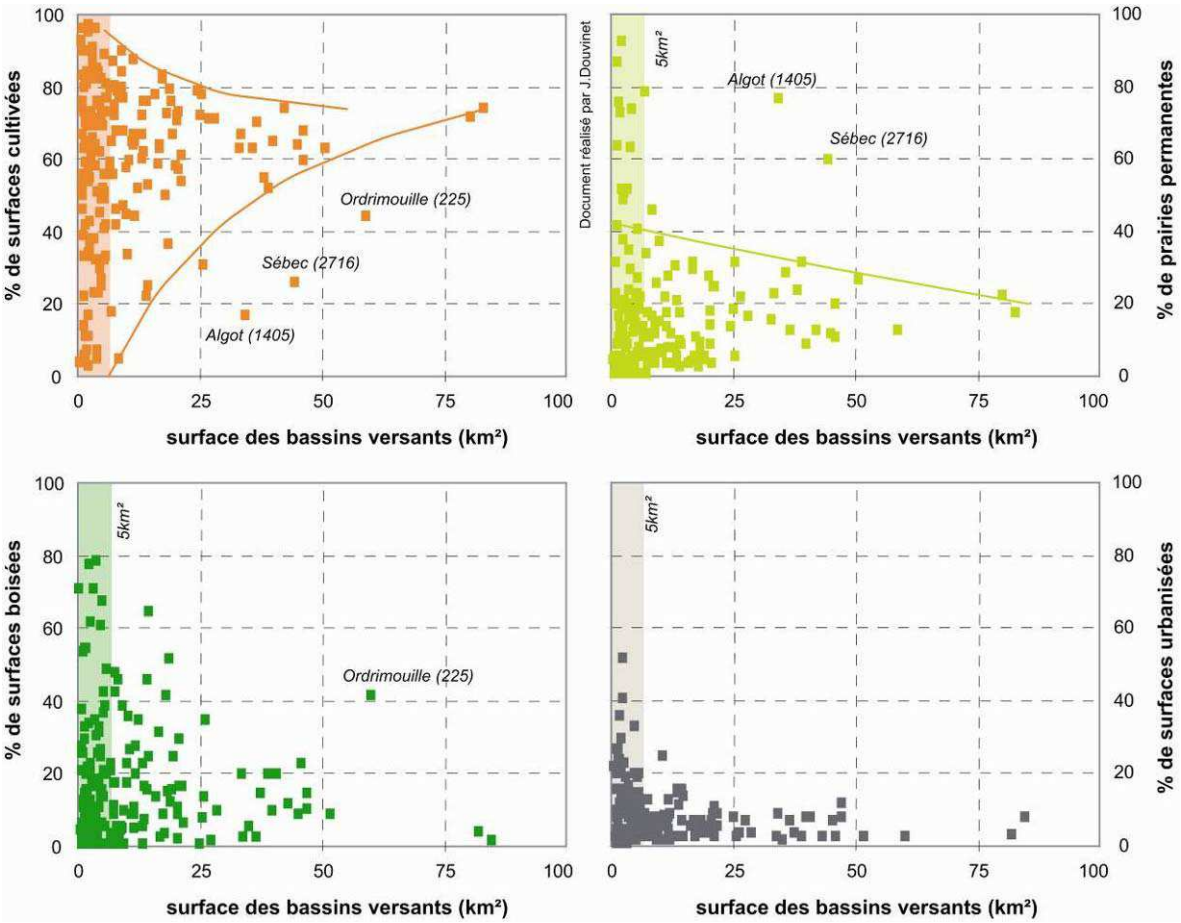


Fig. 6.9. Pourcentages des surfaces relatives à l'occupation du sol et la taille des bassins.

6.3.4. Diversité des configurations internes

Plusieurs bassins, situés dans différents contextes géomorphologiques, sont étudiés afin de voir si une lecture à l'échelle intra-bassin permet de mieux expliquer la diversité du **type 1.**

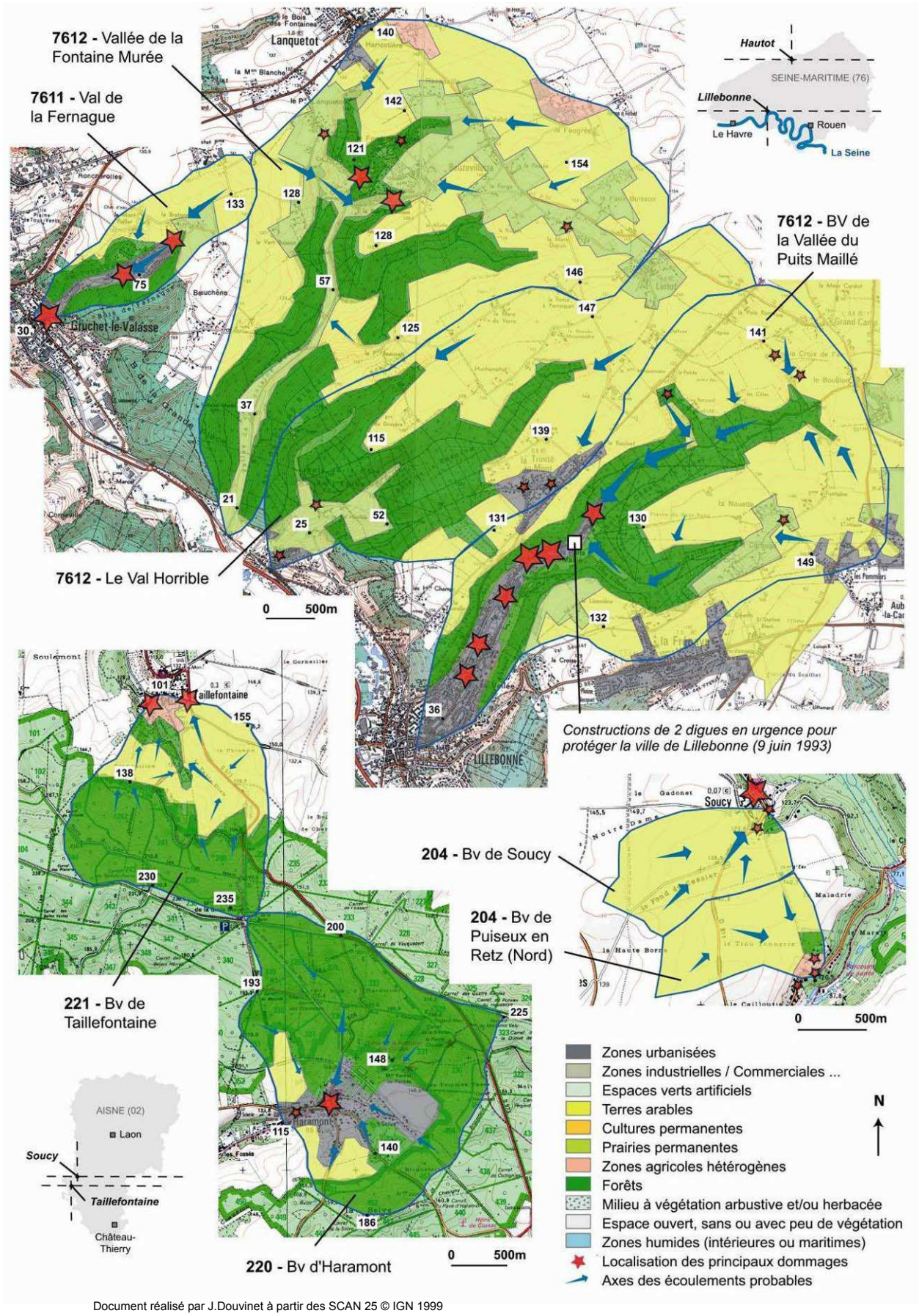


Fig. 6.10. Différentes configurations spatiales : exemples choisis dans l'Aisne et la Seine-Maritime.

Plus un bassin versant se situe dans la partie amont d'un bassin d'ordre immédiatement supérieur, plus la part des surfaces cultivées est élevée. Cette **ségrégation** est **évidente** pour les bassins versants élémentaires (BVE) car l'effet de la morphologie à cette échelle est encore très prégnant. Les bassins de Soucy et Puiseux en Retz (02) sont deux exemples significatifs, avec des terres cultivées sur des pentes faibles qui représentent respectivement 91 et 83 % de la surface totale (fig. 6.10.). Les villages se sont implantés à proximité du rebord de plateau et les dégâts sont liés ici à la très forte proximité spatiale entre cultures et zones urbanisées. On peut directement faire un lien avec la discussion déjà menée à la fin du chapitre 5.

A l'opposé, la **prédominance des espaces boisés** peut s'expliquer pour deux raisons :

- soit ce sont des vallons qui se raccordent le plus en aval possible de très grands bassins versants. Les bassins de la Fernague ou de la Soutraine (76) illustrent cette configuration. Associés, les bois et les prairies dépassent 60 % de la surface totale des bassins.

- soit ce sont des bassins situés sur des buttes éocènes ou calcaires. Les versants pentus sont couverts de bois et les sols sont majoritairement sableux. Sur le bassin d'Haramont (02), la Forêt Domaniale de Retz a une emprise forte en représentant 68 % de la surface totale (fig. 6.10.). **Le fond de vallon, urbanisé, est néanmoins exposé au fonctionnement du bassin**, qui a réagi à un épisode de pluie intense (45 à 70 mm en 1 heure le 7 mai 2000).

Les autres configurations possibles s'intercalent entre les deux situations extrêmes. Dans les fonds des vallons, l'extension urbaine et le réseau routier partagent, avec les prairies, la majorité des surfaces laissées vacantes (fig. 6.10.). Certains vallons sont densément peuplés, ce qui engendre une forte sensibilité au risque dans ces espaces potentiellement traversés par des écoulements rapides et violents.

Des bassins situés à proximité peuvent ainsi présenter des caractéristiques différentes, ne réagissant sans doute pas de la même manière à l'aléa pluviométrique. **L'extrême diversité des valeurs mesurées sur les vallons de petite taille (type 1) s'explique finalement par une pluralité des configurations internes, associées à différentes positions géomorphologiques. Elle s'oppose à la relative stabilité mesurée sur les plus grands bassins (type 2).**

Cette étude à une échelle intra-bassin prouve également que **les bassins touchés au mois de mai font partie des plus cultivés.** Les pluies à l'origine des « *crues rapides* » sur ces bassins ne sont pas extrêmes : le bassin de Montgobert (02), identique à celui de Soucy (fig. 6.9.), a fonctionné à la suite de pluies relativement faibles (12 mm relevés en 15 mn lors de la crue du 24 mai 1994) associées à des antécédents hydroclimatiques (cf. chapitre 4). Dans ce cas-là, l'occupation du sol joue un **rôle important** sur ces bassins et ce mode de fonctionnement fait la transition avec celui des crues turbides hivernales. Le sol des terres cultivées n'étant pas protégé, il se dégrade sous l'effet de la pluie cumulée et les seuils de pluie nécessaires au déclenchement peuvent être plus faibles.

6.4. Etudes de cas à l'échelle « *événementielle* »

A la lecture des résultats précédents, une dernière étude tente de comparer des bassins ayant certaines caractéristiques (pluie, morphologie, occupation du sol) communes. Le but ici est de voir si la sensibilité de l'occupation du sol est minorée ou aggravée par le rôle joué par les autres variables géographiques (pluie et morphologie). Différents bassins, sur lesquels les cartes d'occupation du sol ont été réalisées au lendemain de la crue, ont été confrontés.

6.4.1. Poids de l'occupation du sol sur deux bassins de même taille et soumis aux mêmes conditions pluviométriques : les crues du 16 juin 1997

Le 16 juin 1997, deux crues se sont produites sur des vallons qui présentent des modes d'occupation du sol différents, résultant de configurations morphologiques variées (fig. 6.11.). La comparaison est possible entre ces bassins puisqu'ils sont de taille similaire (~ 14 km²) et que l'épisode pluvieux (80 mm en 6 h) a été identique, même si des variations spatiales et temporelles ont localement pu être élevées. Cette étude fait la synthèse de plusieurs travaux (Hay, 1998 ; MISE-AREAS, 1998 ; Vandewiele, 1998 ; Delahaye, 1999).

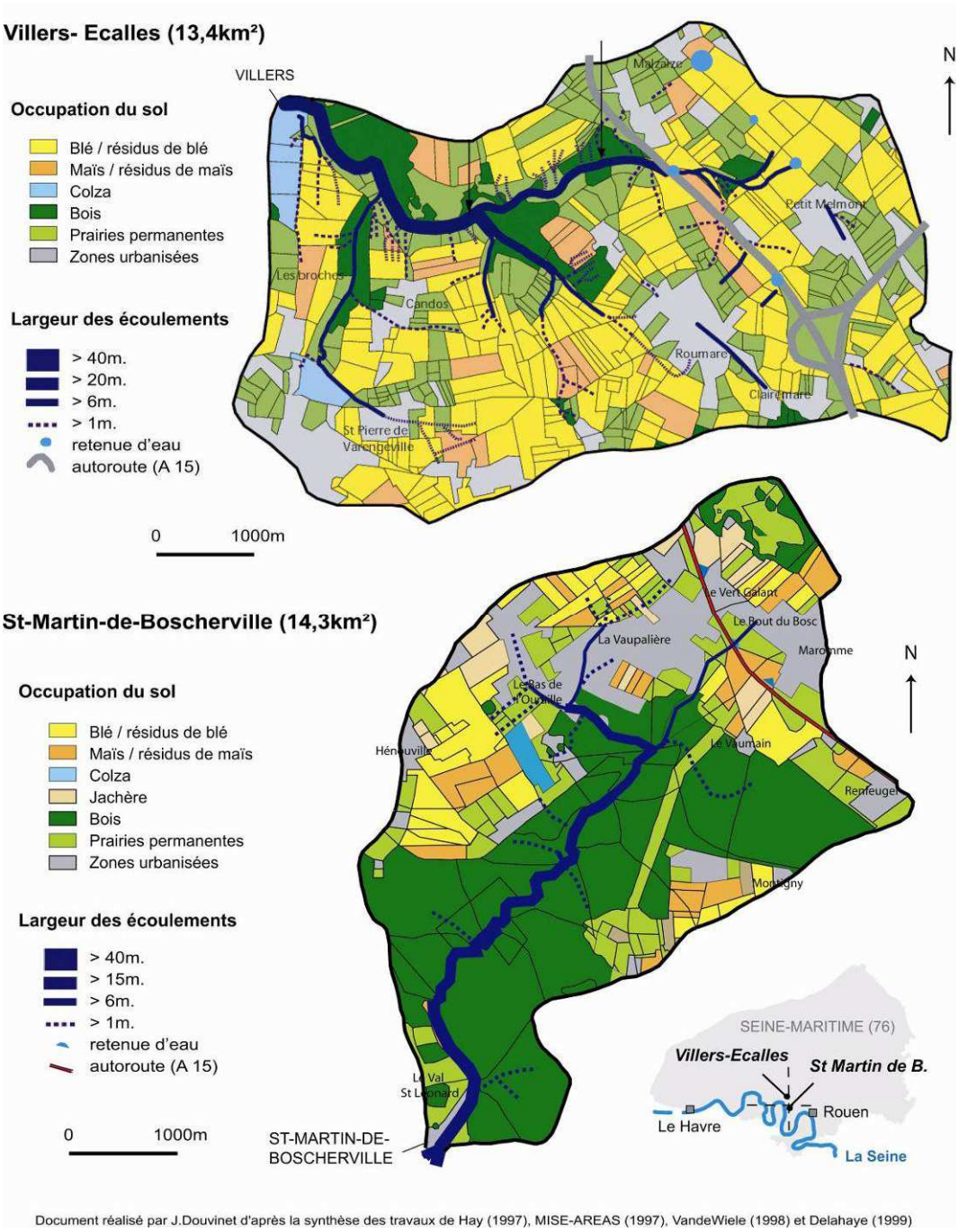


Fig. 6.11. Comparaison des occupations du sol sur deux bassins touchés par le même épisode.

Le bassin de Villers (13,4 km²) présente des pentes plus faibles et les vallons s'incisent de manière douce depuis les plateaux vers le drain principal (fig. 6.11.). Le vallon de St Martin (14,3 km²) présente des pentes et des écarts types de pentes élevés au sein d'une dénivelée également plus prononcée, en particulier dans sa partie amont avec un réseau de vallons qui s'encaissent rapidement et où les pentes excèdent localement 20 % (fig. 1.1.).

Les cultures représentent 21,8 % de la surface totale de St Martin, contre 45,2 % pour les surfaces boisées et 16,7 % pour les prairies permanentes. Les surfaces cultivées en maïs on été à la fois les plus ruisselantes et les plus productives en terre (Delahaye, 1999) et leur capacité d'infiltration est rapidement descendue à 2 $mm.h^{-1}$. Les surfaces imperméabilisées sont aussi nombreuses dans la partie amont du bassin versant (fig. 6.11.).

Le bassin de Villers est différent dans son mode d'organisation. Les surfaces cultivées représentent plus de la moitié de la surface totale (53,2 %), laissant peu de place aux espaces enherbés (24,1 %) et boisés (8,7%). Les terres cultivées (blé, maïs, colza) sont aussi présentes à l'amorce des talwegs secondaires (fig. 6.12.). Les écoulements se sont concentrés vers le fond du talweg principal. Les zones boisées et les prairies ont été incapables de diminuer et de contenir les quantités considérables de ruissellement (Delahaye *et al.*, 2007).

Alors que les deux bassins présentent des **modes d'occupation du sol distincts**, les crues sont apparues suite à des pluies de même intensité. Le pourcentage des surfaces cultivées dans le bassin de Villers semble pallier sa plus faible efficacité morphologique. A l'inverse, l'encaissement très marqué sur le bassin de St Martin explique la rapide concentration des écoulements, dès la partie amont. Dans ce cas là, la morphologie conditionne la réactivité de ces bassins, indépendamment du pourcentage de terres cultivées estimé à l'échelle globale.

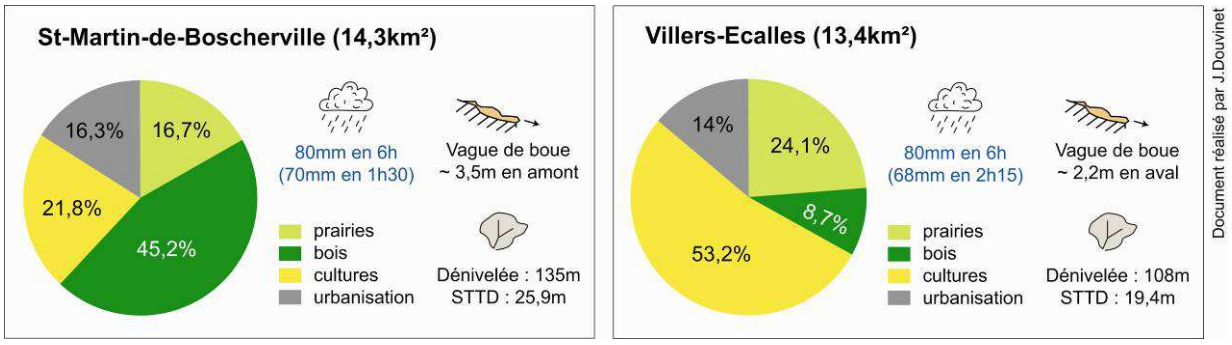


Fig. 6.12. Caractéristiques des crues et occupation du sol sur les deux bassins.

6.4.2. Similitudes entre deux petits bassins versants *a priori* peu sensibles aux « *crues rapides* » : les exemples du 1er juin 2003 et du 28 juin 2005

Les bassins de Callenville (14) et d'Hautot-sur-Mer (76) ont également été comparés car ils sont de petite taille (< 2 km²) et les pluies à l'origine des deux « *crues rapides* » observées ont été intenses sur des pas de temps relativement courts (~ 1 h). Pour rappel, il est tombé 78,5 mm en 1 h le 1er juin 2003 sur le bassin de Callenville, situé sur la rive droite de la basse vallée de la Touques (fig. 1.5.), et entre 75 et 100 mm en 1 h 30 sur le bassin d'Hautot-sur-Mer (fig. 1.7.). Ces deux bassins présentent des caractéristiques morphométriques proches, et les valeurs d'occupation du sol sont relativement similaires (fig. 6.13.). Ils sont majoritairement

couverts par des surfaces enherbées : 52 % pour Hautot-sur-Mer et 66 % pour Callenville. Les terres boisées (respectivement, 10 % et 8 %) et cultivées (14 % et 6%) sont minoritaires. Ces bassins, *a priori* non ruisselants, ont été incapables de limiter les ruissellements à cause des pluies de très forte intensité. **L'aléa pluviométrique et la morphologie expliquent, dans ce cas-là, le fonctionnement de ces bassins enherbés** (fig. 6.14.).

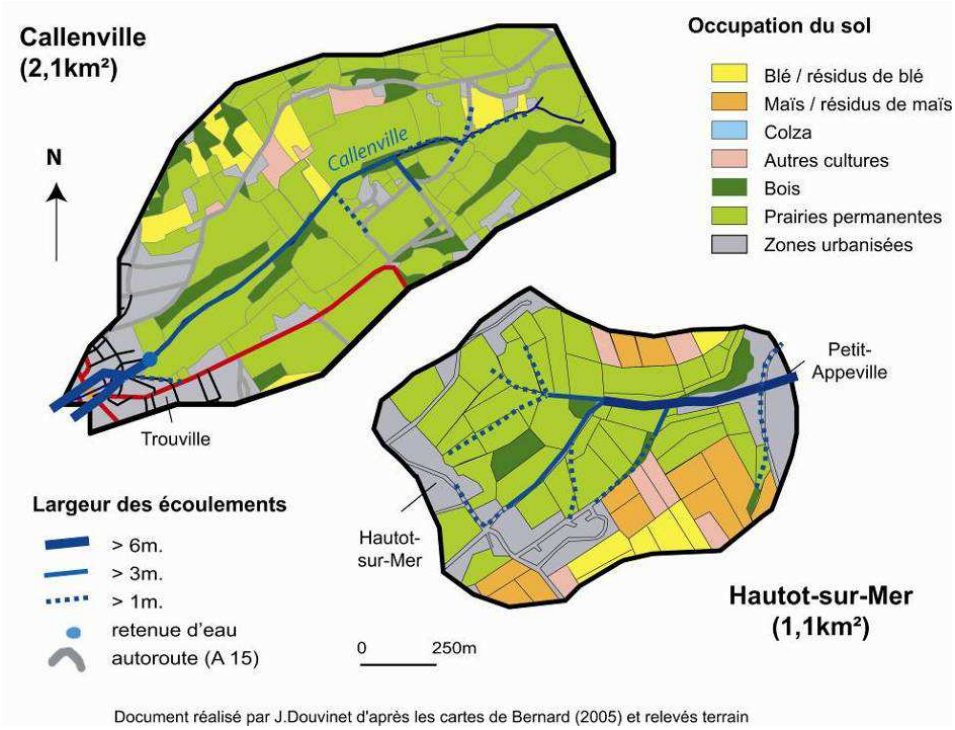


Fig. 6.13. Comparaison des occupations du sol de bassins touchés en milieu herbager.

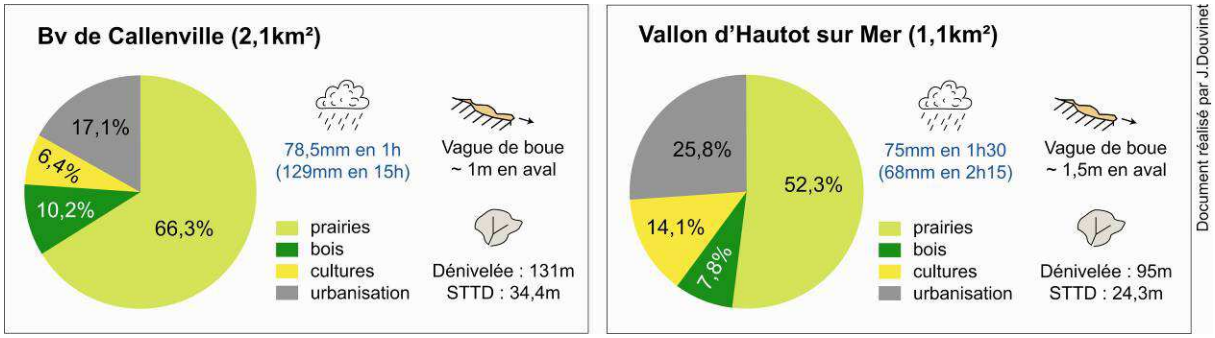


Fig. 6.14. Caractéristiques des crues et occupation du sol sur les deux bassins.

6.4.3. Points communs des bassins situés en milieu d'*openfield* : les exemples du 7 juin 2007 à Estreux (59) et du 8 août 2007 à Vendeuvre (14)

Les exemples suivants sont représentatifs des bassins dominés par les terres cultivées. La crue du 8 août 2007, apparue sur le bassin de Vendeuvre (10,5 km²), a eu une ampleur limitée puisque l'inondation a atteint une hauteur de 0,5 m à l'exutoire (fig. 6.17.). Elle a été générée par des cumuls de pluies de 75 mm tombés entre 14 h et 20 h locales, dont 50 mm entre 15h30

et 17h30 (fig. 6.16.). La pente moyenne de ce bassin est de 1,2 %, avec un maximum de 13 % sur le versant boisé situé au nord du bassin (fig. 6.15.). Les faibles pentes sont favorables au développement des surfaces cultivées qui représentent 93 % de la surface totale du bassin. Aucune haie n'est présente pour arrêter les flux boueux qui se sont concentrés vers l'exutoire.

Sur le bassin d'Estreux (4,1km²) les caractéristiques topographiques sont identiques, avec des versants à faible pente (pente moyenne d'1,4 %) qui sont majoritairement cultivées. La crue a rapidement déferlé sur le centre ville de la commune, où de récents lotissements ont été construits. Une *« vague de boue »* de plus de 2 m a fait de nombreux dégâts (fig. 2.9.) suite à des pluies comprises entre 75 et 100 mm en 2 h (d'après les images radars).

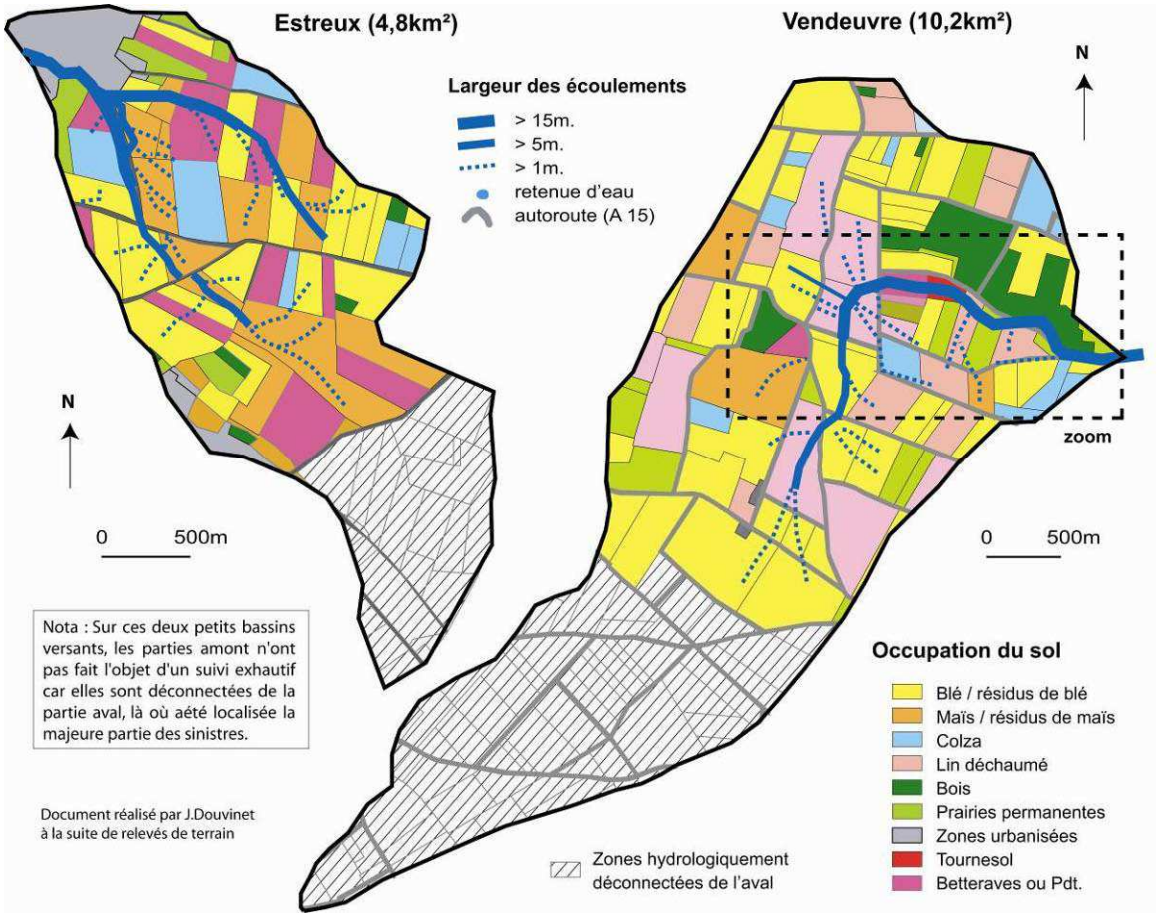


Fig. 6.15. Comparaison des occupations du sol sur deux bassins touchés en milieu d'openfield.

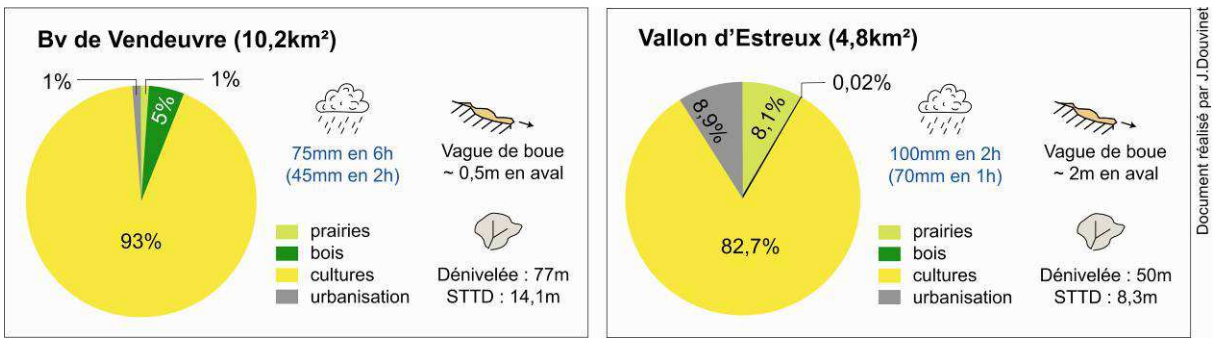


Fig. 6.16. Caractéristiques des crues et occupation du sol sur les deux bassins.

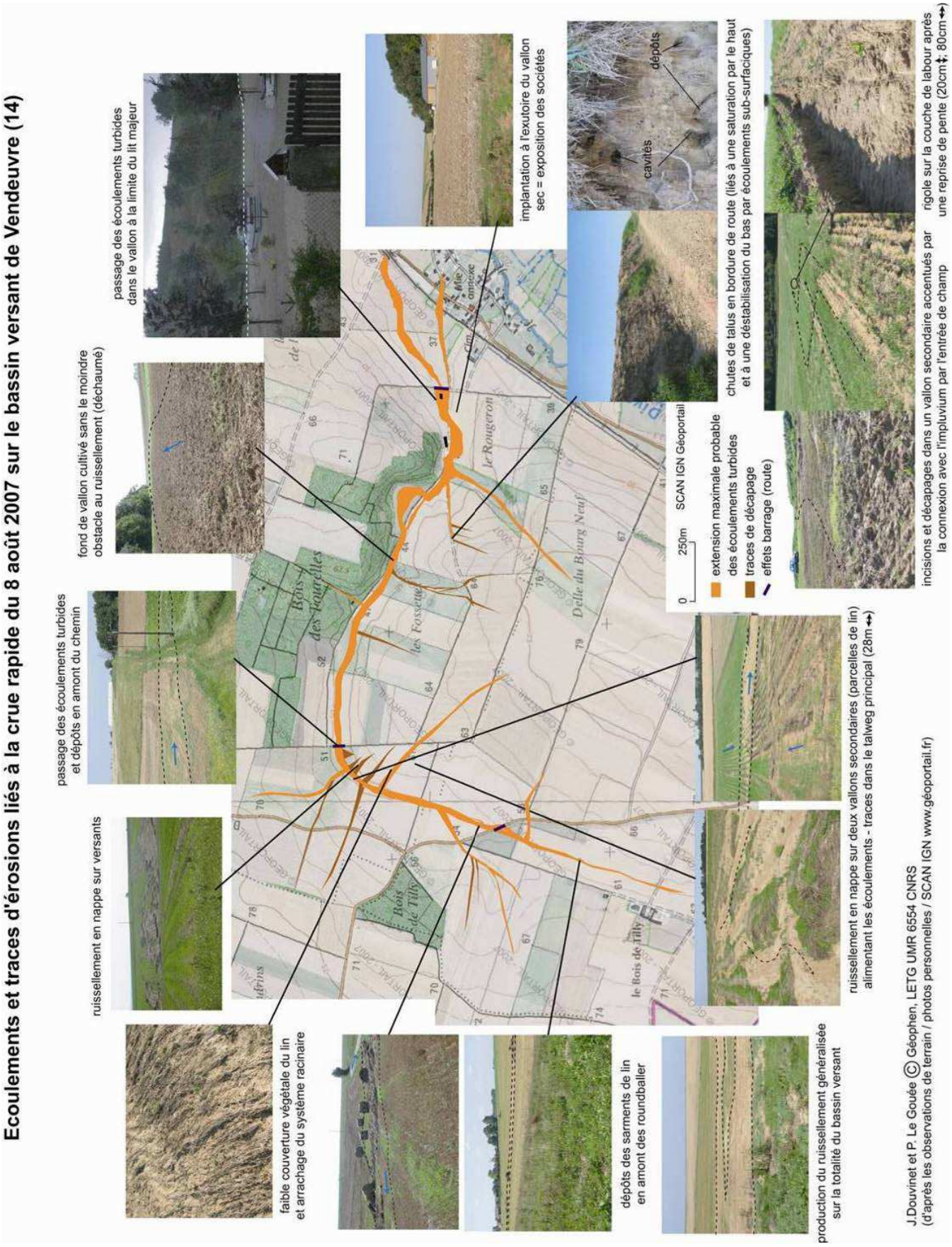


Fig. 6.17. Localisation des formes érosives observées sur le bassin du Vendeuvre (8 août 2007).

L'importance des terres cultivées associée à des pluies volumineuses et intenses explique la violence de la crue observée sur le bassin d'Estreux. Néanmoins, et l'exemple du bassin de Vendeuvre le prouve, les pluies peuvent être plus faibles et plus étalées dans le temps pour faire fonctionner des bassins très cultivés. Les parcelles situées en aval semblent contrôler le débit de pointe tandis que la totalité des surfaces cultivées contribuent aux volumes ruisselés. Ce constat rejoint les résultats d'autres études menées à l'échelle des sites expérimentaux (Le Bissonnais et Souder, 1995 ; Le Bissonnais *et al.*, 1996, 2002 ; Ludwig *et al.*, 1996 ; Martin *et al.*, 1997 ; Martin, 1997 ; Souchère *et al.*, 1998, 2003, 2005).

6.4.4. Discussion

Ces différents exemples montrent finalement que le jeu des variables externes modifie la sensibilité de l'occupation du sol. Plusieurs points sont importants à rappeler :

- quand les pluies sont violentes et intenses, les crues apparaissent indépendamment de la nature de l'occupation du sol ;

- l'encaissement d'un bassin compense la faible part des surfaces ruisselantes ; c'est donc bien la réactivité et l'efficacité hydrologique des bassins qui sont prépondérantes ;

- lorsque les terres cultivées sont importantes, l'intensité de la pluie peut être plus faible. Si elle est violente, les dégâts seront systématiquement dramatiques (Villers, Estreux) ;

- plus les surfaces infiltrantes (bois et prairies) sont nombreuses, plus la pluie doit être, au contraire, intense ou volumineuse (fig. 6.18.) pour engendrer des « *crues rapides* ».

On peut ainsi mieux mesurer l'influence théorique de chacune des variables (fig. 6.18.). Les bassins du type 1, associés à des particularités géomorphologiques ou situés en aval de plus grands bassins, s'opposent aux bassins du type 2, localisés dans la partie amont de plus grands bassins. Plusieurs bassins se situent en position intermédiaire.

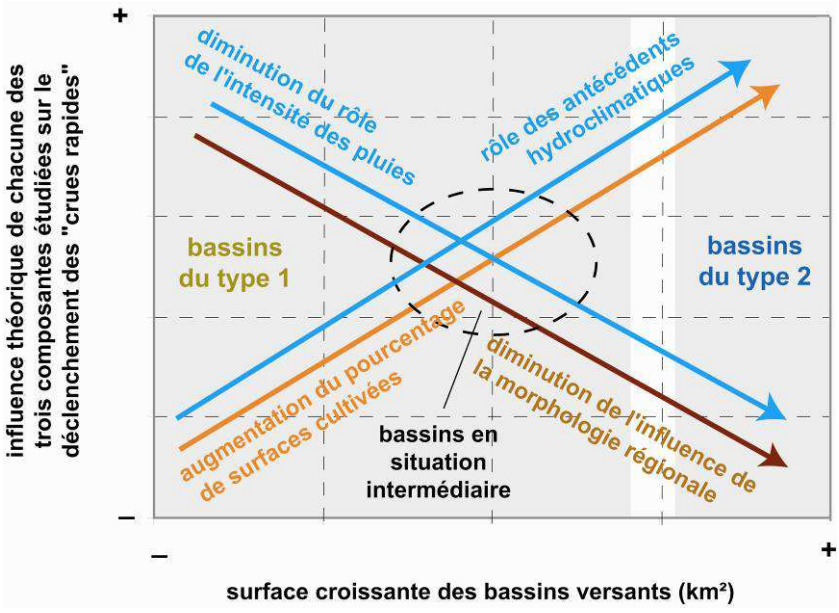


Fig. 6.18. Influence théorique de l'occupation du sol par rapport aux autres composantes.

En faisant la synthèse avec les résultats des chapitres précédents, on se rend aussi compte que deux **modes de fonctionnement** sont à distinguer : les crues du mois de mai (situation intermédiaire avec les crues hivernales) et celles qui apparaissent entre juin et août inclus. Les crues du mois de mai sont spécifiques car elles sont associées à des pluies plus faibles et à des antécédents hydroclimatiques. **Elles apparaissent sur des bassins fortement cultivés.** Le pourcentage de cultures de printemps, peu couvrantes au cours de cette période, est sans doute un élément majeur pouvant expliquer l'apparition des crues lors de pluies plus faibles.

Conclusions du chapitre 6

L'étude de la **sensibilité de l'occupation du sol à travers différentes échelles**, en passant progressivement du niveau **régional** à un niveau **local**, permet d'aboutir à un certain nombre de conclusions. On peut aussi répondre aux questions initialement posées en introduction :

► Les crues sont-elles plus fréquemment recensées dans certaines Régions Agricoles ?

Les cartes de sensibilité à l'aléa érosion des sols à l'échelle annuelle montre que **54** % des bassins touchés (1983-2005) se situent dans des **régions où les sols sont très sensibles**, et ce sont même **77** % des bassins qui se localisent dans des cantons où l'aléa moyen est présent. L'analyse reste toutefois délicate au regard des données et de l'échelle de travail utilisée.

Par contre, les bassins touchés (1983-2005) restent dispersés dans des « *contextes agricoles* » variés. Les données du Recensement Général Agricole (RGA) montrent que les 189 bassins se situent dans des systèmes d'élevage intensif, de polyculture-élevage ou dans des systèmes céréaliers. **Aucune prévalence ne se dégage donc à cette échelle régionale.**

► L'apparition des crues est-elle liée à un pourcentage minimum de terres cultivées ?

L'occupation du sol est une variable importante (il faut un minimum de terres cultivées pour produire du ruissellement) mais **ce n'est pas le seul facteur de prédisposition** car les bassins recensés ne sont pas tous majoritairement cultivés. Les cultures représentent plus de 40 % de la surface totale dans 84 % des cas, et même plus de 60 % dans 68 % de l'échantillon. **Ces chiffres restent néanmoins faibles pour des bassins qui se situent dans ces régions de grande culture du Bassin Parisien**. **Si l'occupation du sol était si discriminante, beaucoup d'autres bassins devraient être recensés dans l'inventaire des bassins touchés.**

L'occupation du sol des bassins de petite taille, inférieure à 5 km², est très variable et cette disparité ne fait que croître en allant vers les **bassins élémentaires**. Les pourcentages des surfaces relatives peuvent osciller entre 0 et 100 %. D'un côté, certains bassins sont nettement cultivés car ils se raccordent très tôt aux impluviums cultivés. D'un autre côté, des bassins se situent le plus en aval possible de grands bassins versants et ils sont fortement boisés et/ou enherbés. Les autres configurations, nombreuses et variées, s'intercalent entre ces extrêmes.

► La place de chaque type d'occupation du sol (surfaces cultivées, boisées ou enherbées) est-elle plus importante que les pourcentages mesurés à l'échelle des bassins versants ?

La variabilité des valeurs amène à relativiser la notion d'occupation du sol moyenne. Les données statistiques ne sont pas adaptées pour expliquer la sensibilité des petits bassins pour

lesquels **une analyse de l'organisation spatiale des différents éléments est nécessaire à une échelle bien plus fine.** L'étude de plusieurs bassins confirme la pluralité des configurations internes et la grande variabilité des pourcentages sur des bassins pourtant situés à proximité.

► La structure interne d'un bassin conditionne-t-elle son occupation du sol ?

La morphologie régionale exerce un contrôle sur l'organisation spatiale des différents éléments du paysage sur les bassins du type 1. La typologie mise en avant dans le chapitre 5 met de nouveau en avant les deux portraits types morphologiques définis dans le chapitre 5. L'extrême diversité des petits bassins (**type 1**) fait face à la relative stabilité des plus grands bassins (**type 2**). Sur ce schéma classique, se calquent de nombreuses différences qui sont liées aux positions intermédiaires des bassins.

► la sensibilité de l'occupation du sol est-elle minorée ou aggravée par l'influence des autres composantes géographiques locales (pluie et morphologie) ?

Le **jeu des variables externes modifie le rôle joué par l'occupation du sol**. Lorsque les pluies sont violentes et intenses, les bassins réagissent indépendamment de la nature des surfaces en jeu. Dans ce cas-là, c'est la **morphologie**, en lien avec l'**aléa pluviométrique**, qui conditionne leur réponse hydrologique. Quand les terres cultivées prédominent, des pluies plus faibles peuvent en revanche être à l'origine de « *crues rapides* ». Cette fois-ci, l'occupation du sol a un rôle plus important, tandis que la morphologie régionale perd de son influence. Le poids théorique des trois variables doit donc être combinée pour mieux appréhender la sensibilité des bassins touchés par des « *crues rapides* ».

Synthèse de la deuxième partie

L'étude de l'aléa pluviométrique et l'analyse de deux facteurs de prédisposition, que sont la morphologie et l'occupation du sol, mettent en avant **plusieurs critères de sensibilité.**

► Un seuil de déclenchement nécessaire mais pas suffisant

L'analyse de la distribution des pluies de forte intensité montre l'existence d'un gradient spatial entre juin et août. Ces pluies semblent plus fréquentes au mois de juin dans la partie occidentale (Calvados, Seine-Maritime), en juillet dans la partie centrale (Seine-Maritime, Oise, Pas-de-Calais), et en août dans la partie nord de la zone étudiée. **Ce gradient spatial** est confirmé par l'étude des maxima, par l'analyse *« par seuil »*, et par la classification des types de circulations proposée à partir de la méthode de Hess-Brezowsky.

L'étude de l'aléa pluviométrique a mis à jour différents **critères de sensibilité.** Dans 80 % des cas, les épisodes à l'origine des *« crues rapides »* ont donné lieu à des pluies supérieures à 40 mm ; 47 % des événements sont liés à des records pluviométriques (1983-2005) mesurés entre mai et août sur un réseau de 85 stations réparti à l'échelle de la zone d'étude. Le seuil de 30 mm permet de détecter **70 % des épisodes et 85 % des crues** qui ont été recensés entre juin et août. Ce seuil semble suffisant pour pouvoir être associé à une *« crue rapide »*, même s'il faut tenir compte de l'éloignement des stations par rapport aux zones très pluviogènes et des possibilités de sous enregistrement de l'intensité des pluies. Les pluies à l'origine de ces crises hydrologiques sont plus faibles pour le mois de mai puisque 70 % des événements sont détectés au-dessus du seuil de 30 mm, contre 9 % seulement pour le seuil de 50 mm.

Néanmoins, les précipitations de forte intensité sont nécessaires mais pas suffisantes pour expliquer l'apparition des « *crues rapides* ». 60 % des pluies supérieures à 50 mm, puis 78 % des pluies supérieures à 30 mm, ne sont pas à l'origine de *« crues rapides »*. Les pluies paraissent également très variables entre les épisodes et sur des bassins situés à proximité.

► Une complémentarité entre la pluie et la sensibilité de l'occupation du sol

L'occupation du sol est une composante importante mais ce n'est pas la seule variable de prédisposition car les bassins recensés ne sont pas tous majoritairement cultivés. Les cultures représentent plus de 40 % de la surface totale dans 84 % des bassins, et même plus de 60 % dans 68 % de l'échantillon. Ces chiffres sont toutefois faibles pour des bassins qui se situent dans ces régions de grande culture du Bassin Parisien. Si l'occupation du sol était si prépondérante, d'autres bassins devraient être recensés parmi les bassins recensés.

Lorsque les pluies sont *« extrêmes »*, elles peuvent entraîner des crues sur n'importe quel type de bassin. C'est pour cette raison que les occupations du sol moyennes sont **variables**, notamment pour les petits bassins (< 5 km²) où les terres cultivées, enherbées et/ou boisées peuvent varier de 0 à 100 %. Quand les pluies sont de moindre intensité, notamment au cours du mois de mai, la part des surfaces cultivées devient plus discriminante. **On met ici en avant un mode de fonctionnement qui fait la transition entre le système hivernal et le**

système estival. La part des terres cultivées n'est pas anodine sur le seuil de déclenchement. Le sol n'étant pas protégé, il se dégrade sous l'effet de la pluie cumulée. Ces événements sont également associés à des cumuls pluviométriques relevés sur les jours précédents.

Ces deux fonctionnements coexistent dans l'espace, ce qui explique l'**extrême diversité** des modes d'occupation du sol sur les 189 bassins versants touchés. D'un côté, des bassins largement cultivés se raccordent très tôt aux plateaux cultivés. D'un autre côté, des bassins situés le plus en aval possible de grands bassins versants sont fortement boisés ou enherbés. **Entre ces deux extrêmes, les situations transitoires sont nombreuses.**

Derrière cette complémentarité entre la pluie et l'occupation du sol se cache également le rôle joué par la variable morphologique qui a une influence à différentes échelles.

► Le contrôle exercé par la variable morphologique

La morphologie régionale ressort comme un facteur de contrôle important car elle définit un stock de bassins potentiellement prêts à réagir en cas de pluies de forte intensité (type 1). Elle perd toutefois de son influence lorsque la taille des bassins augmente au profit de la part des surfaces cultivées. Deux portraits types de bassins sensibles sont clairement distingués.

Les vallons du **type 1**, de petite taille (< 25 km²), se situent en aval de plus grands bassins versants et ils se raccordent aux fonds des vallées humides. Ils sont également caractérisés par un saut d'ordre dans la classification de Strahler. L'extrême diversité de l'occupation du sol sur ces petits bassins est à relier à la pluralité des configurations internes. Plus un bassin se connecte en aval d'un grand bassin versant, plus il a de chance d'être encaissé, donc plus fortement boisé. *A contrario*, un bassin situé dans des secteurs à faible pente ou à proximité des parties amont, risque d'être largement cultivé. Une plus grande dissection du relief se traduit par un morcellement des principaux éléments du paysage, avec une extension des zones boisées et/ou des prairies permanentes au détriment des terres cultivées.

Les bassins du **type 2**, moins nombreux (11 bassins sur les 189 recensés), sont tributaires de critères purement morphométriques. Ils se situent en amont des grands bassins versants et leur ordination respecte les règles hortoniennes, contrairement aux bassins précédents qui se démarquent avec un saut d'ordre marqué. Les pourcentages relatifs à l'occupation du sol moyenne sont homogènes. Cette stabilité des valeurs met à jour un contrôle morphologique, différent du contrôle morphologique régional : c'est la **taille** des bassins et leur **position** en amont des grands bassins qui commande la répartition des éléments du paysage.

La morphologie joue donc un rôle dans la distribution spatiale des bassins touchés, et elle influence également l'organisation spatiale de l'occupation du sol au sein de ces entités.

Malgré son importance, le poids de la morphologie à l'échelle locale reste difficile à mesurer. La classification automatique des bassins à partir des indices morphométriques n'a pas donné de résultats satisfaisants. Ce travail se poursuit alors plus spécifiquement sur ce paramètre**.** On souhaite notamment appréhender son rôle sur la dynamique des écoulements de surface qui sont la principale source d'alimentation des *« crues rapides »*.

Partie III

Vers une mesure dynamique de l'influence de la morphologie sur la réponse hydrologique des bassins versants

Introduction de la troisième partie	p. 188
Chapitre 7 – Les indices morphométriques à l'épreuve du temps	p. 189
Chapitre 8 –Un automate cellulaire pour simuler l'influence de la morphologie sur les écoulements de surface – Orientations méthodologiques	p. 219
Chapitre 9 –Influence des structures spatiales : émergences et jeux d'échelles	p. 241
Synthèse de la troisième partie	p. 265

Modèle Numérique de Terrain (MNT)
Source : données © IGN 2004

Introduction de la troisième partie

Paradoxalement, si la deuxième partie souligne l'importance du contrôle morphologique, **son influence sur la dynamique des écoulements de surface et en corollaire, sur la réponse hydrologique des bassins versants, reste difficile à mesurer.**

« Bien que la pente soit a priori favorable au ruissellement et à l'érosion, son influence n'est pas facile à mettre en évidence dans les régions de grande culture correspondant généralement à des faibles pentes » (Le Bissonnais et Gascuel-Oroux, 1998). Néanmoins, plusieurs travaux ont démontré le rôle joué par l'organisation morphologique des bassins versants sur le fonctionnement des *« crues rapides »* (Hauchard, 2001 ; Delahaye, 2002). Apparaissant à la suite de fortes pluies, la vitesse de concentration de l'écoulement serait principalement liée à la combinaison entre la forme d'un bassin, son réseau de talwegs, et son système de pentes.

Cette troisième partie a, dès lors, pour objet de mettre en place une méthodologie pour mieux évaluer l'influence dynamique de la morphologie sur la réponse hydrologique des bassins versants. Le but recherché ici est **double** : décrire le rôle joué par chaque composante morphologique en tout point de l'espace ; décomposer la construction spatiale de la réponse hydrologique, depuis les échelles locales jusqu'à l'échelle globale du bassin versant.

De nombreux chercheurs ont mis au point différentes méthodes pour évaluer de manière quantitative une telle influence. Les indices morphométriques, les plus classiques, ont été les toutes premières mesures créées par les géomorphologues pour corréler les caractéristiques physiographiques d'un bassin à son potentiel hydrologique. Profitant du développement des SIG (Système d'Information Géographique), de l'augmentation des capacités des ordinateurs et de l'explosion du nombre de données numériques de terrain (MNT), les approches se sont aujourd'hui multipliées. Parmi les plus connus, on peut citer les modèles spatialisés, semi-distribués, ou les modèles physiographiques distribués (Cudennec, 2000 ; Moussa, 2003).

Il s'avère alors nécessaire de faire un état des connaissances sur les différentes approches qui existent (**chapitre 7**) pour savoir quel est l'outil d'analyse le plus adapté pour répondre aux objectifs de cette étude. En fonction des résultats obtenus à la suite de cet état des lieux, la méthode choisie (**chapitre 8**) puis les résultats (**chapitre 9)** seront commentés.

Chapitre 7

Les indices morphométriques à l'épreuve du temps

Introduction	**p. 190**
7.1. Place de la morphométrie en hydrologie	**p. 190**
7.2. Etat des connaissances : Types d'indices et variables associées	**p. 194**
7.3. Limites d'utilisation des indices classiques	**p. 209**
7.4. Orientation vers des méthodes plus synthétiques	**p. 214**
Conclusions du chapitre 7	**p. 217**

Introduction

Les indices morphométriques ont été les **premières mesures créées en géomorphologie** pour **comparer** les caractéristiques morphologiques des bassins versants et pour **quantifier** leur comportement hydrologique potentiel (Llamas, 1993 ; Lambert, 1996 ; Cosandey, 2003). Les apports de la morphométrie sont considérables car ils ont constitué les premières formes de réflexion sur le transfert d'échelle en géomorphologie (Hauchard, 2001). Ils ont également posé les bases théoriques de tout un courant de pensée en hydrologie, avec notamment des rapports hortoniens qui confirment la tendance naturelle à la concentration des écoulements (Rigon *et al.*, 1993 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Cosandey et Robinson, 2000).

Paradoxalement, si les indices morphométriques se retrouvent aujourd'hui en préambule de la plupart des ouvrages hydrologiques, ils sont utilisés pour **présenter le comportement moyen d'un bassin,** et la relation avec la dynamique des processus hydrologiques est parfois sujette à caution (Bardossy et Schmidt, 2002 ; Bendjoudi et Hubert, 2002 ; Delahaye, 2003).

Ce chapitre a, dès lors, pour objet de répondre aux quatre questions suivantes :

► à quelle période et dans quel but les indices morphométriques ont-ils été créés ?

► est-il possible de proposer une classification des indices en fonction des différentes variables morphologiques étudiées ?

► pourquoi la relation entre la morphométrie et l'hydrologie est-elle en partie remise en cause ? Quelles sont les critiques et les limites d'utilisation évoquées ?

► peut-on traduire la dynamique de la réponse hydrologique d'un bassin versant de manière dynamique et synthétique ? Est-il possible d'associer la structuration interne d'un bassin à la nature de son comportement hydrologique ?

Un bilan complet et exhaustif sur les indices morphométriques n'a jamais été proposé en hydrologie. La démarche retenue repose alors sur les points suivants : rappel historique de la place de la morphométrie en hydrologie (§ 7.1.) ; indices et variables morphologiques associées (§ 7.2.) ; contraintes et limites d'utilisation (§ 7.3.) ; orientation vers des méthodes et des outils d'analyse plus synthétiques et plus dynamiques (§ 7.4.).

Cette approche doit permettre de voir si les indices existants sont adaptés à la mesure de la dynamique induite par la morphologie sur les écoulements de surface. Le cas échéant, on devra se tourner vers de **nouvelles méthodes** ou **pallier les éventuelles limites mises à jour dans le cadre de cette étude.**

7.1. Place de la morphométrie en hydrologie

Les **premières mesures morphométriques** sont sans doute apparues chez les **Egyptiens** qui étaient soucieux de délimiter les surfaces régulièrement inondées par le Nil (Zavoianu, 1985). Ces mesures, concomitantes à l'édification des temples et des Pyramides, formeraient les prémices de la géométrie comme le soulignent par ailleurs les livres anciens grecs.

Ce n'est qu'**à la fin du XIX^{ème} siècle que les premières mesures morphométriques vont voir le jour** (Hauchard, 2001). L'apparition des cartes topographiques en 1870, suivie par les progrès de la science au XX^{ème} siècle, vont permettre le foisonnement de nombreux indices avec des applications diverses et nombreuses. Très rapidement, le besoin se fait sentir d'unifier les nombreuses méthodes dans une seule discipline qui aurait ses propres notions, son propre vocabulaire, ses paradigmes. La mesure des formes, i.e. la **morphométrie**, devient d'une grande importance pour toutes les sciences qui étudient les formes du monde naturel : la biologie, la zoologie, la biologie, la minéralogie, l'anthropologie, la géographie, et bien d'autres domaines, etc. ne peuvent alors entreprendre de profondes études sans se baser sur des données morphométriques.

Certains courants de pensée en géographie physique vont créer leurs propres termes pour se détacher et se démarquer de cette « *morphométrie* » au sens large : la *géomorphométrie* (terme utilisé par M. Morisawa, 1959) regroupe les méthodes mesurant la forme de la croûte terrestre ; *l'hydromorphométrie* sert à caractériser la taille et la forme d'un chenal d'écoulement avec des paramètres spécifiques (Bravard et Petit, 2000 ; Jacob *et al.*, 2006).

Les premières utilisations de la morphométrie en hydrologie datent de la **fin du XIX^{ème}** siècle (fig. 7.1.). Les premiers travaux ont pour objectif de voir en quoi la **forme d'un bassin** versant (allongement, compacité, circularité) influence le régime des cours d'eau. H.K Kestlin (1884[1]) emploie une formule pour déterminer le débit pour des petits bassins versants dans laquelle les variables sont la surface du bassin et un coefficient dépendant de la longueur du drain principal. La première carte avec des isolignes représentant le débit moyen spécifique est attribuée à K. Newell en 1892 (cité par Anon, 1854, *in* Zavoianu, 1985).

Les **travaux de l'Ecole d'Hydrologie de Russie** vont marquer un tournant important : la surface, l'altitude moyenne et la longueur du cours d'eau principal sont désormais utilisées pour caractériser les écoulements sur la base de formules empiriques. Ces équations sont toujours utilisées aujourd'hui, en particulier pour caractériser le temps de concentration d'un bassin (Llamas, 1993). Les indices morphométriques sont aussi utilisés pour corroborer des hypothèses scientifiques. Se basant sur des indices morphométriques, P.S. Jovanovic (1940) essaie par exemple de quantifier l'influence de différents facteurs sur les profils en long des cours d'eau. Mais les données sommaires à partir desquelles P.S. Jovanovic était parti, et le fait qu'on ignore, à l'époque, les modalités de transport des sédiments, expliquent pourquoi ses résultats sont passés pour « *irréalistes* » (Zavoianu, 1985).

Les travaux suivants s'inscrivent dans une perspective de quantification de l'organisation spatiale des composantes morphologiques principales en essayant de décrypter les lois qui régissent un bassin versant comme l'encaissement ou la distribution des réseaux (Delahaye, 2005). Les hydrologues vont dès lors **tirer profit de la morphométrie** pour tenter de mieux comprendre la dynamique des processus hydrologiques, notamment par le biais du système d'indexation des réseaux et des lois de développement proposés par R.E. Horton (1945).

A partir des années 1950, l'utilisation du **système de classification hortonien** se propage rapidement. La morphométrie est considérablement enrichie par les travaux des chercheurs américains (Strahler, 1952a ; Schumm, 1956 ; Leopold et Miller, 1956 ; Hack, 1957 ; Melton, 1957 ; Morisawa, 1958 ; Scheidegger, 1966 ; Shreve, 1966 ; Smart, 1968…). Les recherches de A.N. Strahler (1952b) sont importantes car après avoir complété la méthode de R.E. Horton, elles ont fourni les bases à de nombreux concepts et à plusieurs lois basés sur la physique, les

[1] Les travaux de Kestlin sont souvent mentionnés mais la source est introuvable (R.B. Pike, USGS, communication orale).

mathématiques et les statistiques. De nombreux travaux vont ensuite étudier les relations qui existent entre différents indices, en appliquant des modèles mathématiques et des méthodes statistiques (Doornkamp, 1969 ; Chorley *et al.*, 1957, 1969 ; Gregory et Walling, 1973).

L'utilisation des indices dans les études géographiques va se généraliser, en ayant pour objectif la **mise en évidence des caractéristiques hydrologiques à l'échelle régionale**. Dans son ouvrage de 1958, A.N. Strahler dénombre **36 indices** pour définir la géométrie des cours d'eau et 16 indices pour décrire le comportement dynamique des bassins versants.

A. Christofoletti (1970) présente les indices, les méthodes et les résultats obtenus sur une dizaine de bassins brésiliens. Il est le premier à tester une matrice de corrélations entre tous les indices. Il profite de cette occasion pour vérifier la signification des valeurs obtenues pour chaque indice tout en interprétant les résultats en fonction de l'évolution géomorphologique et la lithologie de la région considérée. **L'approche de A. Christofoletti marque un tournant capital puisque toutes les études morphométriques futures vont systématiquement relier les indices aux caractéristiques lithologiques du milieu** (Milton, 1966 ; Abrahams, 1984).

Certains travaux gardent comme objectif la **régionalisation** des indices physiographiques (Gaucherel, 2003 ; Reddy *et al.*, 2004) mais la plupart s'en démarquent. En effet, les nouvelles méthodes (les Systèmes d'Information Géographique et les outils dérivés de l'Intelligence Artificielle), l'acquisition de données numériques de terrain, ou les capacités de calcul des ordinateurs, ont **bouleversé les études** portant sur la morphométrie. Des études se focalisent ainsi sur le développement des drains d'ordre 1 (Srinivasan *et al.*, 1988 ; Dietrich *et al.*, 1993). D'autres chercheurs travaillent sur les modalités de propagation des crues (Beven *et al*, 1988 ; Serrat et Depraetere, 1997 ; Cudennec, 2000), sur la non linéarité des processus à l'origine de la relation complexe qui existe entre la morphologie et la réponse hydrologique (Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997; Sivapalan *et al.*, 2002) ou sur la dimension fractale prise par certains indicateurs (Bendjoudi et Hubert, 2002 ; Breyer et Snow, 2002).

L'agencement du réseau devient fondamental pour considérer le chemin et le temps de transit depuis les zones sources jusqu'à l'exutoire. La *fonction-largeur* (ou *width function*) de R.L. Shreve (1966) permet de considérer le nombre de liens hydrologiques (talwegs) situés à égale distance de l'exutoire, prenant ainsi en compte le réseau et la forme du bassin versant. **Cette fonction reste aujourd'hui l'un des outils les plus pertinents pour relier la forme d'un bassin et son réseau hydrographique à la réponse hydrologique qui découle de cette organisation** (Moussa, 1991 ; Veitzer et Gupta, 2001 ; Mantilla *et al.*, 2006). Des travaux plus récents ont amélioré le calcul et la méthode d'extraction de cette fonction, en y associant les versants. La fonction est ainsi devenue *fonction aire-distance* dans les travaux de I. Rodriguez-Iturbe et J.B. Valdès (1979), voire *Link Frequency Distribution (LFD)* chez K. Kirkby (1976).

Ce **rapide historique** montre à quel point les indices ont fait – et font toujours – l'objet d'applications dans des travaux alliant des contextes et des problématiques différentes. **Si ils ont été utilisés pour leur capacité à être appliqués à l'hydrologie, ces indices sont surtout devenus des outils de référence car ils sont simples et faciles à calculer** (Gaucherel, 2003).

Un état des connaissances réalisé sur les indices les plus couramment cités en hydrologie (Delahaye *et al.*, 2005) a également permis de voir que l'on pouvait dissocier ces indices en quatre catégories, décrivant chacune des composantes principales : des **indices de forme**, des **indices de volume**, des **indices de réseaux** et des **indices** « ***croisés*** » qui tentent de combiner deux des trois variables morphologiques. Il est alors possible de proposer une **typologie** des indices couramment cités en hydrologie en fonction de la variable qu'ils décrivent.

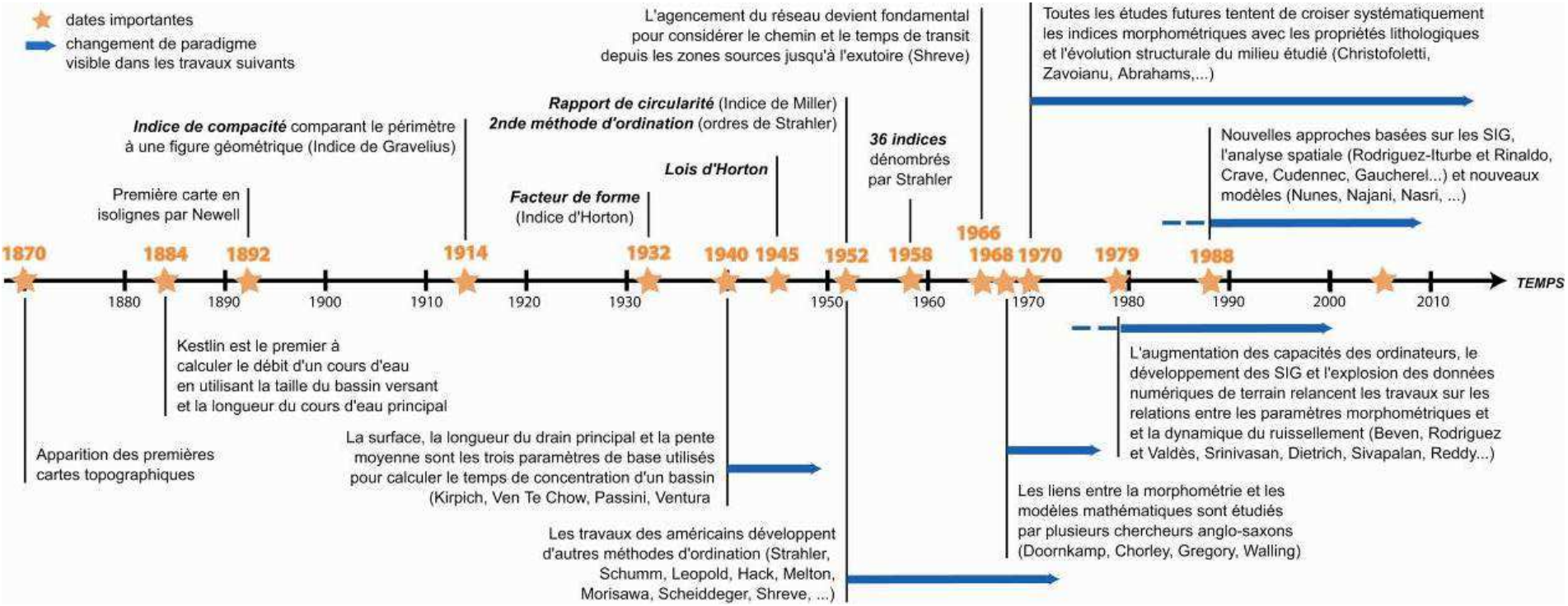


Fig. 7.1. Frise chronologique mentionnant les dates de création des indices morphométriques les plus connus en hydrologie et changements d'objectifs des études les utilisant (Douvinet *et al.,* 2008).

7.2. Etat des connaissances : Type d'indices et composantes morphologiques associées

7.2.1. Des indices de forme pour décrire l'allure et la forme d'un bassin

Les **indices de forme** ont été créés pour pouvoir comparer des bassins de taille différente. **La forme du périmètre est importante à mesurer car elle traduit le degré de compacité ou d'étalement d'un bassin**, ce qui a des conséquences sur le chemin théorique que devraient prendre les écoulements de surface. Pour une même pluie, les bassins allongés ont tendance à favoriser les faibles débits de pointe ; en revanche, les bassins en forme d'éventail ont un temps de concentration plus court et des débits de pointe plus élevés (Lambert, 1996).

A cet égard, des **tentatives de géométrisation** des formes géographiques sont apparues très rapidement. C. Ritter (1826) est le premier à exprimer le caractère plus ou moins massif des continents en rapportant leur surface à la longueur du périmètre. Les **premiers indices de forme** vont s'inspirer de ces tentatives de géométrisation en comparant le périmètre d'un bassin à une **figure géométrique simple :** cercle, carré, polygone, rectangle, ellipse, etc. Les premiers indices sont créés à partir du cercle car « *on sait que le cercle est la figure dont la surface est maximale pour un périmètre donné, ou, de façon duale, la figure dont le périmètre est minimal pour une surface donnée* » (Bendjoudi et Hubert, 2002). On s'attend ainsi à ce que le périmètre d'un bassin donné soit supérieur à celui d'un cercle pour une surface équivalente.

H. Gravelius (1914) finalise cette première approche avec l'***indice de compacité*** (indice de Gravelius **Kc** ou **K²**). Cet indice rapporte le périmètre **P** d'un bassin à la circonférence d'un cercle ayant la même surface **A**. Plus le bassin a un indice proche de 1, plus le bassin a une forme arrondie et proche du cercle. La valeur de 1,128 correspond à un carré parfait ; pour les bassins allongés, l'indice peut aller jusqu'à 3. Plus l'indice grandit, moins le bassin est compact (Ibisate, 2004) (fig. 7.2.).

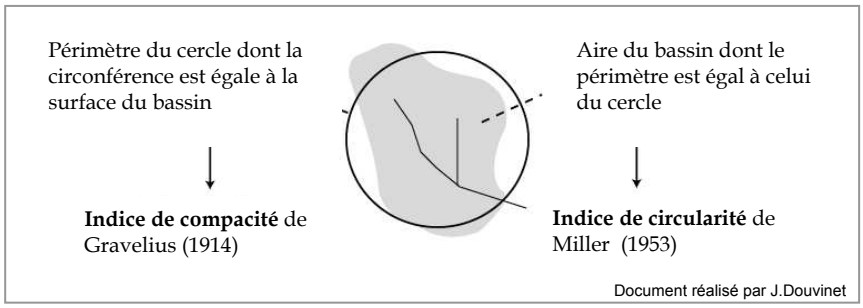


Fig. 7.2. Construction de l'indice de compacité de Gravelius et de l'indice de circularité de Miller

V.C. Miller (1953) définit un ***indice de circularité*** **(Ic)** rapportant le périmètre d'un bassin au cercle ayant une circonférence identique. La valeur de 1 identifie un bassin parfaitement circulaire ; la valeur de 0,785 est valable pour un bassin carré. Cet indice est l'inverse de celui de Gravelius. M. Saam (1998) calcule un ***indice de développement*** : il croise le périmètre d'un bassin au périmètre minimal ayant la même surface que le bassin. La ***méthode du rectangle***, créée par H. Gravelius et améliorée par Ch. Péguy en 1942 (***méthode du rectangle équivalent***) consiste à confronter le bassin à un rectangle ayant même surface et même périmètre.

Les bassins ont généralement **une forme ovoïde** qui ressemble « *vaguement à une poire* » (Gray et Wigham, 1972). Partant de cette observation, R.J. Chorley *et al.* (1972) comparent le périmètre du bassin étudié à celui de la *lemniscate* dont la forme a été définie par Bernoulli. Le ***lemniscate ratio*** compare la surface du bassin à la lemniscate de même longueur *l* et de même facteur de correction *k*e (Fig. 7.3.). Ils considèrent alors que la surface limitée par la lemniscate correspond à la « *forme idéale du bassin* » (Bendjoudi et Hubert, 2002).

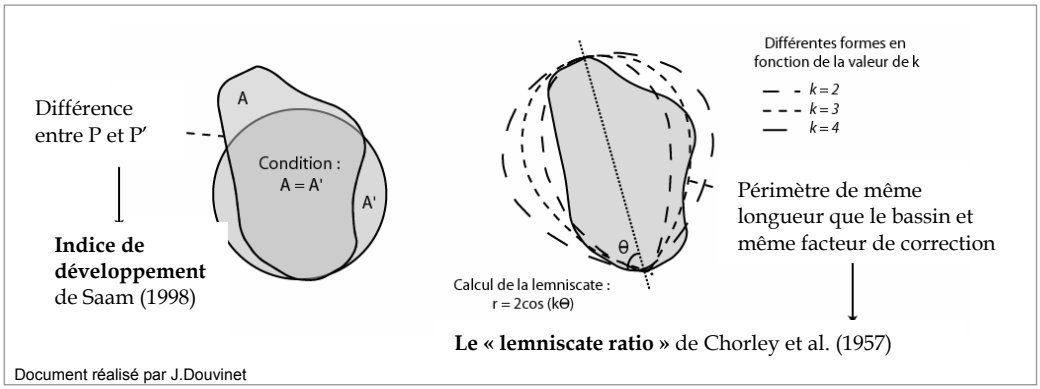


Fig. 7.3. Indices de développement de Saam (1998) et le « *lemniscate ratio* » de Chorley *et al.* (1957)

Plusieurs chercheurs tentent également de mesurer le degré d'allongement d'un bassin. R.E. Horton (1932) définit un ***facteur de forme*** **Rf** en rapportant la surface du bassin étudié à celle d'un carré dont les côtés sont l'équivalent de la longueur du drain principal (tab. 7.1.). Pour un carré, l'indice **Rf** est égal à 1, et pour un rond, **Rf** équivaut à 0,886. Deux bassins de forme identique, quelle que soit leur taille, auront un **Rf** identique, ce qui permet par conséquent de caractériser leur forme indépendamment de leur surface. Cet indice devient un ***facteur de forme inversé*** chez S.K. Jena et K.J. Tiwari (2006). J. Llamas (1993) préfère lui utiliser la distance axiale (la plus grande distance parcourue à vol d'oiseau) pour obtenir un ***coefficient de forme*** **Kf** qui ne tient pas compte de la sinuosité du drain principal.

S.A. Schumm (1956) établit un rapport entre le diamètre du cercle de même superficie que le bassin, et la plus grande longueur de talweg du bassin. A partir de ce ratio, il crée ainsi un ***indice d'allongement ou indice d'élancement*** **Re** [indice confondu avec l'*indice d'élongation* dans les travaux d'A. Ibisate (2004)]. Pour un bassin rond, **Re** sera égal à 1, tandis que la valeur diminue pour des bassins élancés (Re ~ 0,6).

Caquot crée un ***indice d'élancement moyen*** **Rem** en utilisant le plus long chemin potentiel parcouru par l'eau depuis le point le plus en amont (Réméniéras, 1986). L'***indice d'étalement*** de I. Morton peut aussi aider à mesurer l'élancement d'un bassin en comparant sa surface au ratio d'élongation, même si cet indice est souvent réservé à des applications en climatologie. L'***indice d'élongation*** permet de mesurer l'allongement uniquement à partir du périmètre : le bassin est un carré parfait si **IE** est égal à 4. En revanche, plus la valeur **IE** est élevée, plus le bassin est allongé (Samm, 1998 ; Moussa et Bocquillon, 1996 ; Liébault *et al.*, 2002).

La plupart des indices sont calculés à partir des valeurs de périmètre et de surface qui se mesurent à l'époque par planimétrie sur les cartes topographiques, avec un curvimètre. Les valeurs sont dépendantes de l'échelle de la carte, ce qui peut toutefois poser des problèmes d'interprétation suivant l'échelle d'analyse (Bardossy et Schmit, 2002). Des chercheurs vont alors chercher à améliorer ces indices de forme en se basant sur des mesures plus précises.

N°	Nom de l'indice [symbole]	Formule / Equation	Auteurs / Sources	Description / Commentaires
1	Coefficient de compacité [Kc ou K²]	Kc = P / (2 √ (πr)) K² = 0,28 * (P / √ A)	Gravelius, 1914	Kc est le rapport entre le périmètre d'un bassin, et la circonférence d'un cercle la même superficie (A).
2	Rectangle de Gravelius, ou Méthode du rectangle équivalent de Péguy [Rg]	1 : Rg : P = 2 * (L1 + ℓ2) 2 : Rg = (Kc*√A)/ 0,28	1 : Gravelius ,1914 2 : Péguy, 1942	Rg sert à comparer le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même surface.
3	Indice, rayon ou coefficient de circularité [c, Rc ou Rci]	Ic = 1 / (Kc ou K²)² Rc (ou Rci) = 4π A / P² Rci = 12,57 * (A / P²)	Miller, 1953	Rc est le rapport entre la superficie du bassin et celle du cercle dont la circonférence est égale au périmètre du bassin.
4	« Lemniscate ratio » [Lmi]	Lmi = (L² π) /4 A	Chorley *et al.*, 1957	Lm est le rapport du périmètre du bassin étudié au périmètre de la lemniscate de même longueur.
5	Indice ou facteur de forme *(Indice d'Horton)* [Rf]	Rf = A /(Lb)² ou Rf = √A / Lb (id)	Horton, 1932	Rf est le rapport entre la surface du bassin et la longueur maximale du bassin mis au carré.
6	Indice de forme inversé [Sb]	Sb = Lb² / A	Jena et Tiwari, 2006	Sb est la longueur à vol d'oiseau mise au carré divisée par la surface totale du bassin.
7	Coefficient de forme (*Form ratio*) [Kf]	Kf = ℓm / ℓα	Llamas, 1993	Kf est le rapport entre la largeur moyenne du cours d'eau principal et la longueur axiale, distance mesurée à vol d'oiseau.
8	Index d'élongation [IE]	1 : IE = P / (√ A) 2 : Er = Lb / √ A	1 : Saam, 1998] 2 : Liébault *et al.*, 2002	IE ou Er est le rapport entre le périmètre d'un bassin (ou la longueur maximale) et la racine carrée de sa superficie.
9	Indice d'allongement ou d'élancement du bassin [Re]	1 : Re = (2/Lb)*A/√A/π) 2 : Re = 1,128 * (√A/Lb) 3 : Re = (1,129 * $A^{0.5}$)/ Lb 4 : Re = (2 - √(A/π) / Lb	1, 2 : Schumm, 1956 ; 3 : Ibisate, 2004 4 : Delcaillau, 2001	Re est le rapport entre le diamètre du cercle ayant la même surface que le bassin, et la longueur maximum Lb de ce dernier.
10	Indice d'allongement moyen [Rem]	Rem = E / (√A)	[attribué à Caquot par Réméniéras, 1986]	Rem est le rapport entre le plus long parcours de l'eau E entre la périphérie et l'exutoire du bassin, et la racine carrée de sa surface.
11	Indice d'allongement à partir du rectangle équivalent [Ia]	Ia = L / l	Serrat et Depraetere, 1997	Ia est le rapport entre la longueur L et la largeur l du rectangle équivalent.
12	Indice d'élongation à partir de l'ellipse équivalente [β']	β' = [(*a* + *b*) * 100] / *b* (x-1)	Moussa, 1991, 1995	β' est un paramètre exprimé par le rapport entre la largeur *a* et la longueur *b* maximales définies à partir de l'ellipse équivalente.
13	Indice de compacité à partir de l'ellipse équivalente [IC]	IC ou β = b / a	Moussa, 1991	IC est défini par le rapport entre la longueur *a* et la largeur *b* de l'ellipse équivalente.
14	Indice de développement [D]	D = P / ((A/ π) * 2π)	Saam, 1998	D permet de comparer le périmètre effectif d'un bassin au périmètre minimal compte tenu de sa superficie.
15	Indice d'étalement du bassin [Ie]	Ie = A / (π (0,5 * IE)²)	Morton, 1932	Ie rapporte la surface du bassin à l'indice d'élongation défini à partir de cette même surface.
16	Distance au centroïde du Bv [Lca]	Lca = L(G-L(Alt.Min))	Jena et Tiwori, 2006	Lca est la longueur entre le centroïde du bassin (associé au point G) et l'exutoire.

Tab. 7.1. Noms, formules et sources des **indices de forme** couramment utilisés en hydrologie (P = Périmètre ; A = Surface ; Lb = Longueur maximal du cours d'eau ; r = rayon du cercle)

R. Moussa (1991, 1993) préfère se baser sur l'***ellipse équivalente*** pour définir de nouveaux indices indépendants de l'échelle (tab. 7.1.). Il calcule un ***nouvel indice de compacité*** en se basant sur le centre de gravité du bassin et en rapportant les deux axes principaux d'inertie : le demi grand axe *a* dans le sens de la longueur, et le demi petit axe *b* dans le sens de la largeur (Fig. 7.4). Cet indice est tel que pour un bassin allongé, **Ic** tend vers une valeur nulle, alors que la valeur tend vers 1 pour un bassin circulaire (Charleux-Demargne, 2001).

Ce nouvel indice équivaut directement à la ***distance au centroïde*** calculée par S.K. Jena et K.J. Tiwari (2006). Pour éliminer le facteur d'échelle, les valeurs sont ensuite normalisées par les aires respectives des bassins versants, ce qui permet d'adjoindre aux différents indices des valeurs statistiques (moyenne et écart-type des bassins normalisés). On peut aussi définir un ***indice d'orientation du bassin*** défini par l'angle Δ, entre la direction de référence, qui correspond à l'axe des abscisses d'orientation (E/W) et le demi grand axe *a*. En traçant le cumul des distances normalisées en fonction de leur orientation par rapport à l'exutoire, on obtient une **forme caractéristique des bassins versants** qui met en évidence les directions principales puis secondaires (Baize, 1998 ; Font, 2002).

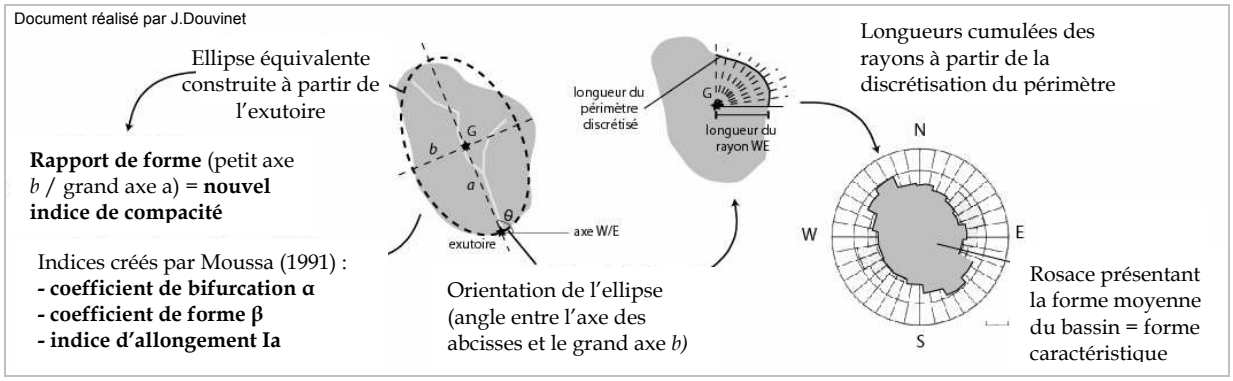


Fig. 7.4. Nouveaux indices créés à partir de l'ellipse équivalente (modifié d'après Moussa, 1991).

Pour cette première catégorie, on recense donc 16 indices de forme **qui permettent de comparer la forme de bassins de taille différente.** Deux orientations ont été privilégiées :

- comparer cette forme à des figures géométriques simples (carré, cercle, rond) ;
- mesurer le degré d'allongement en utilisant des linéaires au sens théorique (longueur axiale) ou hydrologique (longueur maximale du drain principal).

7.2.2. Des indices de volume pour caractériser la distribution du relief

Les indices de volume ont été créés plus tôt. Ils succèdent à des outils graphiques qui ont été précocement utilisés au début du XIX^{ème} siècle en géomorphologie structurale (Hauchard, 2001). Ils font plus largement partie des outils utilisés en géomorphologie quantitative et leur utilisation dépasse le simple cadre de l'hydrologie.

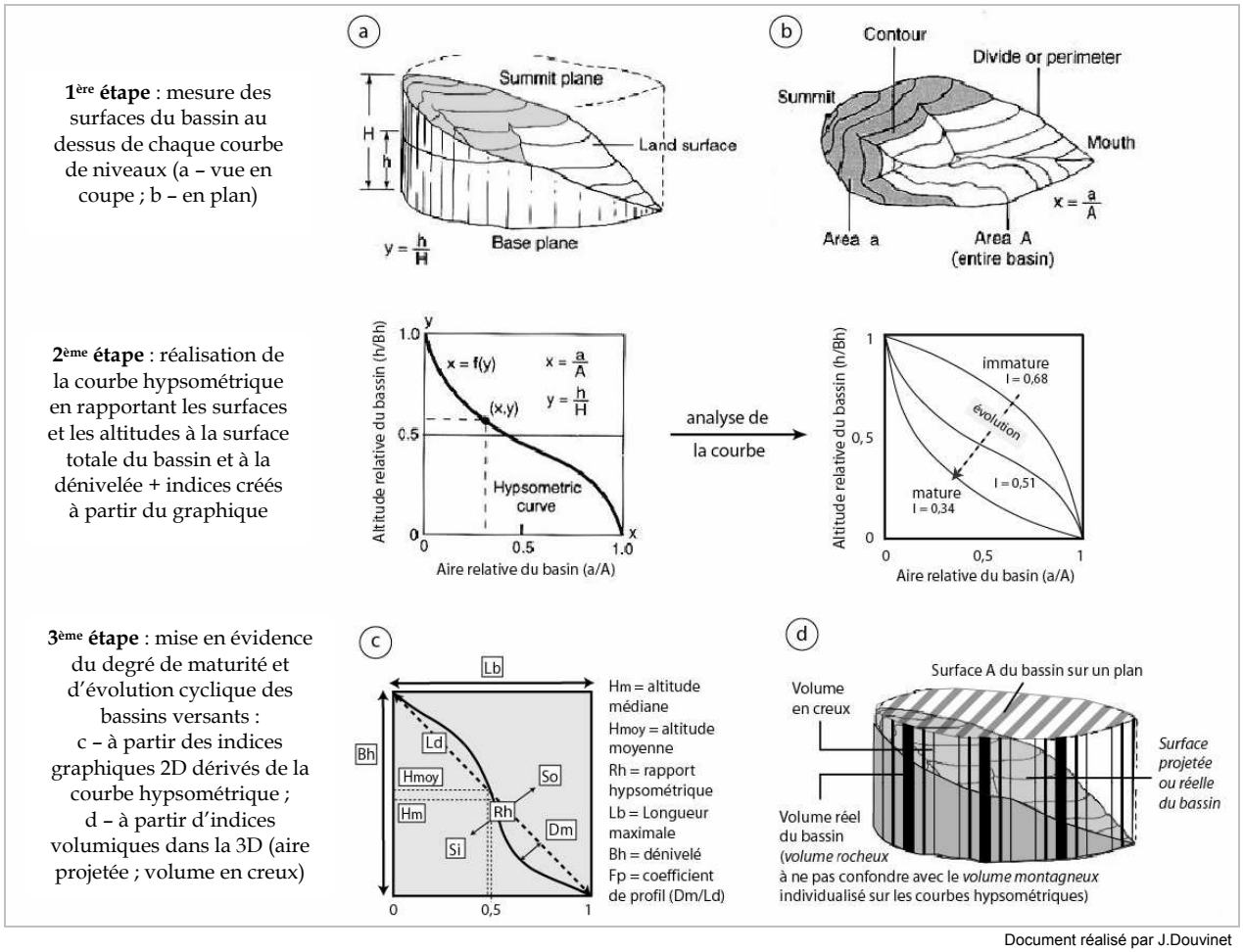
La ***courbe hypsométrique*** reste l'outil graphique par excellence (Baize, 1998 ; Delcaillau, 2001 ; Font, 2002) : elle exprime l'aire planimétrique des tranches d'altitude en fonction de la surface relative du bassin. Elle permet ainsi de révéler l'évolution structurale d'un bassin (De Humbolt, 1842 ; Strahler, 1952b), et elle donne un bon résumé des distributions altimétriques et topographiques (Luo, 1998 ; Grohmann, 2004).

Le principe a été établi au milieu du XVIII[ème] siècle (De Humbolt, 1842 ; Koritska, 1854), mais la représentation graphique a été finalisée un peu plus tard, au début du XIX[ème] siècle (Baulig, 1926, 1950, 1957, 1959 ; Hauchard, 2001, fig. 7.5.).

Selon A.N. Strahler (1952), l'allure des courbes hypsométriques permet de **déterminer le degré de maturité** ou **d'évolution cyclique** du relief. De forme concave, la courbe indique que le bassin est en état de maturité, avec une valeur Ih inférieure à 0,4. Au contraire, les bassins versants sont immatures, jeunes, ou en cours de soulèvement si la courbe est convexe et si la valeur de ***l'intégrale*** (Ih) est supérieure à 0,6. Les fortes intégrales traduisent une forte dissection caractéristique des bassins à forte digitation du réseau de drainage ou à lithologie (marnes, schistes) propice à une forte dégradation (Delcaillau *et al.*, 1998).

L'utilisation des courbes hypsométriques répond ainsi à plusieurs objectifs :
- montrer l'impact de la tectonique et l'incidence des processus de dissection ;
- mettre en avant les différences qui existent entre deux bassins ayant le même domaine morphologique, mais constitués de lithologies différentes (Delcaillau, 2004) ;
- quantifier les volumes de roche mobilisés et/ou mobilisables.

Les autres outils graphiques (les courbes de fréquence des altitudes, les profils d'aération ou les diagrammes clinographiques) répondent aux mêmes objectifs (Gelabert *et al.*, 2005).



Document réalisé par J.Douvinet

Fig. 7.5. Construction et interprétation de la courbe hypsométrique d'un bassin versant (modifié d'après les travaux de Strahler, 1952, 1957 ; Birot, 1949, 1955 ; Font, 2002).

Les premiers indices de volume vont s'attarder sur le ***volume montagneux*** matérialisé par les courbes hypsométriques. A.N. Strahler (1952, 1957) définit un ***rapport hypsométrique*** **Rh** (ou ***ratio de dissection***) où il compare la surface au-dessus de la courbe (*So*) à celle qui est en dessous (*Si*). Un rapport de 1 (fig. 7.5.) souligne une forte stabilité morphologique du bassin étudié. L'importance de la déviation du profil, de forme concave la plupart du temps, peut être quantifiée en calculant le ***coefficient de profil***.

Les irrégularités matérialisées par des coefficients élevés traduisent l'existence de seuils morphologiques calqués sur les unités structurales majeures (Carozza et Delcaillau, 2000 ; Delcaillau, 2001). Ch. Péguy (1942) choisit d'établir un ***coefficient volumétrique d'écoulement*** (**Cvd)** pour comparer le volume montagneux au volume d'eau écoulée dans l'année**.** Il crée aussi un ***indice d'énergie*** (**IE)** qui résulte du produit du volume montagneux par la pente. Ses indices confirment l'influence de la nature lithologique des bassins versants.

Un ***indice d'asymétrie*** (**AF**) permet d'évaluer l'importance de la dissection différentielle entre deux versants (fig. 7.6.) et matérialise le degré d'éloignement du cours d'eau principal, souvent lié à des facteurs tectoniques et lithologiques. Pour des bassins soumis à des régimes tectoniques stables, la valeur de **AF** sera proche de 50 (Hare et Gardner, 1985, *in* Font, 2002). Dans la littérature, on peut trouver un autre indice, le ***facteur de symétrie topographique transverse*** **(T),** rapportant la distance médiane du bassin (soit celle du cours d'eau principal) sur la distance ligne médiane (ligne de partage des eaux ; tab. 7.2.).

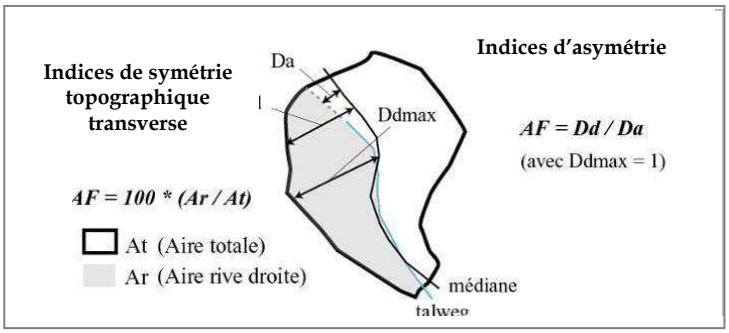


Fig. 7.6. Mesurer l'asymétrie de deux versants (modifié d'après Delcaillau, 2001).

D'autres méthodes aboutissent à des indices de volume simplifiés. Baulig (1926) calcule une ***altitude moyenne*** Hmoy, d'après la somme des surfaces calculées pour chaque intervalle définies par les courbes de niveau relevées sur les cartes topographiques. K.P. Berger et K.P. Entekhabi (2001) améliorent le calcul par un ***rapport de dénivellation ou d'élévation*** **Rr** en rapportant les différentes altitudes à la longueur maximale du bassin (tab. 7.2.).

J. Schmidt et R. Dikau (2000) créent un ***indice de soulèvement*** **Rt**, rapportant la dénivelée Hmoy à la surface, afin de tenir compte de la taille du bassin. **Mesurer la pente devient en soit un indicateur de volume, et de nombreuses méthodes existent.** H. Baulig (1926) calcule un ***angle moyen de pente***. J. Llamas (1993) utilise à la fois le volume montagneux calculé sur les courbes hypsométriques, la dénivelée ou le périmètre, pour obtenir cet angle moyen de pente. R. Benson (1959) affine le calcul de la ***pente moyenne*** en utilisant les centiles 15 et 85 (15 % et 85 % des pentes mesurés sur la totalité du bassin versant). I. Linsley (1982) préconise l'utilisation de la pente de la ligne d'eau tracée depuis l'exutoire pour le calcul de cette pente moyenne (Hauchard, 2001).

D'autres chercheurs tentent d'améliorer l'indice de pente : K.P. Berger et K.P. Entekhabi (2001) et E. Mohamoud (2004) créent un ***indice de pente médiane*** qui donne la fréquence f(50) sur la totalité des pentes recensées sur le bassin ; R. Lo et J. El Mabrouk (2003) proposent un ***indice de pente*** **Ip** en pondérant les différentes pentes sur l'inverse de la longueur maximale du bassin. Cet indice est pertinent dans les régions géomorphologiques homogènes ; la pente diminuant de l'amont vers l'aval, l'indice **Ip** diminue lorsque S augmente. Il est également possible de calculer les écarts-types de pentes (***SSTD***, cf. chapitre 5). Les bassins qui ont des écarts-types élevés ont, en général, une topographie accidentée, alors que les bassins à faible écart-type présentent des systèmes de pente plus uniformes (Delcaillau, 2004).

Le système de pentes est devenu un élément important à mesurer. De nombreux modèles intègrent cette pente comme variable majeure de contrôle de la dynamique fluviale à partir des équations issues des travaux de S.A. Schumm (1957). Avec l'***indice de pente moyenne***, J.K. Young *et al.* (1996) déduisent une vitesse du ruissellement, le pouvoir érosif moyen et la capacité de transport de celui-ci. Ils arrivent à obtenir une relation exponentielle d'un facteur 1,5 entre l'érosion et la pente. B. Gelabert *et al.* (2005) utilisent cet indice pour mettre en avant le rôle de la lithologie sur l'organisation des cours d'eau à Ménorque (Espagne). Certains chercheurs mesurent ainsi la proportion de pentes supérieures à 15% ou inférieures à 3% afin de définir des zones soumises ou non à l'érosion (Saam, 1998 ; Gelabert *et al.*, 2005). Dans l'optique d'une caractérisation écologique des plans d'eau, M. Saam (1998) utilise même le ***taux de relief***, où il rapporte la dénivelée à la racine carrée de la superficie, pour symboliser la capacité du bassin versant à « *déplacer des composés à travers le paysage* » (tab. 7.2.).

N°	Nom de l'indice [symbole]	Formule / Equations	Auteurs ou sources	Description / Commentaires
1	Courbe hyspométrique ou hypsographique [Ch]	1 = Ch : (zi/Z) f(ai/A) 2 = Ch = ∑ (Ai * hi)	1 = Strahler, 1957 2 = Birot, 1955	Ch représente la courbe cumulée des surfaces dont l'altitude Ai est supérieure à chaque courbe de niveau hi.
2	Volume montagneux [Vm]	Vm = ∫(hi * Ai)	Birot, 1955	Vm est le produit de la hauteur par une surface enveloppe pour chaque courbe de niveau i. On cumule donc le volume situé entre la courbe et l'axe des ordonnées y.
3	Intégrale hypsométrique [∫h]	1 : ∫h = ∫ (zi/Z) f(ai/A) 2 : S ou Hi = ∑ (zi /Hmax)	1 : Strahler, 1952b 2 : Carozza et Delcaillau, 2000	∫h est l'intégrale des altitudes et des surfaces du bassin, toutes deux exprimées en pourcentage. On rapporte chaque altitude au max.
4	Rapport hypsométrique ou ratio de dissection [Rh]	Rh = So / Si	Strahler, 1957	Rh est le rapport entre le volume situé au dessus de la courbe du bassin, et celui qui est en dessous.
5	Coefficient de profil [Fp]	Fp = Ldm / Ld	Baulig, 1926	Fp est le rapport de la plus grande déviation de la courbe Ldm sur la longueur de la droite Ld.
6	Indice d'asymétrie du bassin [AF]	AF = 100 * (Ar / A)	Hare et Gardner, 1985, [*in* Delcaillau, 2001]	AF est le rapport entre la surface en rive droite d'un bassin Ar et la surface totale A de celui-ci.
7	Altitude moyenne [Hmoy]	Hmoy = ∑ (ai * hi) / A	De Humbolt, 1842	Hmoy et la somme des altitudes Ai pour chaque courbe de niveau hi divisée par la surface A.
8	Ratio de dénivelée ou d'élévation [Rr ou Rh]	Rr = Bh / Lb	Berger et Entekhabi, 2001	Rr est le rapport de la dénivelée sur la distance entre les deux points les plus éloignés au sein du bassin.
9	Indice d'aération [I_A]	I_A = Bh (Altmax) / Hmoy	Serrat et Depraetere, 1997	I_A est le rapport entre la dénivelée et l'altitude moyenne du bassin.

N°	Nom de l'indice [symbole]	Formule / Equations	Auteurs ou sources	Description / Commentaires
10	Angle moyen de la pente [β]	$\beta = \Delta_{b\text{-}a} / L_{b\text{-}a}$	Baulig, 1928	β est le quotient de la hauteur et de la distance parcourue entre deux points a et b.
11	Pente moyenne ou pente principale [βm or S*mean*]	1 = βm = Vm / A 2 = βm = 2Bh / P 3 = βm = $h_{(80\text{-}15)}$ / $L_{(80\text{-}15)}$	1 et 2 = Llamas, 1993 3 = *pente 85-15* de Benson, 1959	βm est le quotient du volume montagneux par la surface totale du bassin ; pente principale définie par les centiles 85 et 15.
12	Pente médiane [S50]	S50 = F50 (Bh)	Berger et Entekhabi, 2001	S50 est la fréquence qui se trouve à 50% sur la totalité des pentes recensées sur le bassin.
13	Indice de pente [Ip]	Ip = (1/Lb) * ∑ (βmc)	Luo et Harlin, 2003	Ip est le produit de l'inverse de la longueur maximale du bassin et de la somme de la pente entre chaque courbe de niveau βmc.
14	Ecart-type de pente (s*tandard deviation of slope*) [*SSTD*]	SSTD = √ (βi)	Mohamoud, 2004	SSTD est la racine carrée de la variance des pentes βi relevées sur l'ensemble du bassin versant (à partir des points d'un MNT)
15	Dénivelée spécifique [Ds]	Ds = Ig / √A	Birot, 1955	Ds est le rapport entre l'indice global de pente Ig et la racine carrée de la surface du bassin.
16	Taux de relief *(relief factor)* [T]	T = Bh / √A	Saam, 1998	T est un taux entre le dénivelé et la racine carrée de la surface A du bassin versant.
17	Indice de soulèvement (*index of relief thickness)* [Rt]	Rt = Hmoy / A	Schmidt *et al.*, 2000	Rt est le rapport entre l'altitude moyenne et la surface du bassin versant étudié.
18	Coefficient volumétrique d'écoulement [Vcd]	Vcd = D / Vm	Péguy, 1942	Vcd est le rapport entre le volume d'eau écoulée dans une année D et la volume montagneux Vm.
19	Indice d'énergie [I ou IE]	IE = ∑ (Hmoy i) / ni I = Vm * βh	Baize, 1998	IE est la moyenne des altitudes moyennes prises au sein du bassin versant.
20	Volume en creux [Vc]	Vc = (A * Bh) / ∑ (ai * Bhi)	Font, 2002	Vc est la différence entre la surface du bassin en plan et le volume réel projeté dans une dimension triaxiale, ce qui donne le volume érodé ou creusé.
21	Indice d'évidement [Vé]	Vé = V(Bh) / Vm	Baize, 1998 ; Font, 2002	Vé rapporte la surface du bassin qui correspond à la surface d'érosion post cénomanienne à la surface sous enveloppe.
22	Aire projetée ou aire réelle [Ap ou Ar]	Ap = ∑ ((api / cos(sli))	Font, 2002	Ap est la somme des aires projetées de chaque pixel composant le bassin versant (aires rapportées à la pente) dans une dimension triaxiale.

Tab 7.2. Noms, formules et sources des **indices de volume** couramment utilisés en hydrologie (P = Périmètre ; A = Surface ; Lb = Longueur maximal du cours d'eau ; Bh : la dénivelée)

Le système de pentes a fait l'objet de nombreuses recherches dès la fin du XIX^{ème} siècle, et on recense ici **22 indices de volume**. Associée à des outils graphiques, qui ont une vocation purement descriptive, la plupart des indices ont été créés pour caractériser la distribution du relief par un indice « *moyen* », révélateur des caractéristiques internes du bassin versant et de son évolution structurale.

7.2.3. Des indices de réseau pour mesurer son degré de hiérarchisation

Un réseau hydrographique est l'ensemble constitué par un cours d'eau et ses affluents. Il draine une région plus ou moins vaste (bassin versant) et son chevelu**,** plus ou moins ramifié, s'organise de façon hiérarchisée autour du cours d'eau principal. Le réseau hydrographique peut ainsi se caractériser par son type, sa hiérarchie, sa densité, l'orientation des drains, leur longueur, les anomalies de tracé… (fig. 7.8.). Le chevelu a plusieurs dénominations suivant la manière dont il est organisé dans l'espace. Les différentes approches ont permis de dresser une typologie abondante des différentes ramifications possibles (Howard, 1967, *in* Lambert, 1996), qui est même qualifiée de « *surabondante* » par J. Salomon (1997).

La mise en place d'un réseau hydrographique se fait sous le contrôle des contraintes structurales (Bravard et Petit, 2000). Pour des conditions lithologiques peu perméables, le réseau est souvent dendritique. Le chevelu présente une forme arborescente et les différents cours d'eau divaguent dans n'importe quelle direction. Les réseaux radiaux ou annulaires désignent des réseaux issus d'un sommet, alors qu'à l'inverse, le réseau centripète alimente des dépressions marquées, souvent appelées bassins endoréiques ou cuvettes de subsidence. Des « *tronçons en baïonnette* » caractérisent, quant à eux, les régions à relief plissé (fig. 7.8.).

En parallèle à l'approche qualitative, des méthodes d'ordination sont apparues dans le but d'évaluer la fonctionnalité de l'organisation structurelle des réseaux.

H. Gravelius crée la première méthode en 1914. Il attribue le niveau 1 à la rivière principale, le niveau 2 à celles qui se jettent dedans, et remonte ainsi de suite jusqu'aux zones sources. R.E. Horton (1945) propose l'inverse (fig. 7.7.) : tout cours d'eau ayant un affluent de rang *u* est lui-même de rang *u + 1*. **La part de subjectivité de l'ordination de R.E. Horton est supprimée par A.N. Strahler en 1952.** Ce dernier ajoute de la hiérarchie au sein du réseau hydrographique : sa méthode consiste à attribuer une valeur à chaque tronçon en partant des têtes de bassin, fractions appelées « *biefs extérieurs* ». Dans le cas d'un bassin organisé de manière optimale, deux bassins élémentaires d'ordre 1 s'agrègent pour former un bassin d'ordre 2, deux ordres 2 pour former un ordre 3, et ainsi de suite pour les ordres supérieurs. Cette méthode se prête mieux à la quantification car elle ne masque pas certains cours d'eau de rang inférieur, à l'inverse de la méthode d'Horton. Un cours d'eau ne conserve pas non plus le même rang sur toute sa longueur, ce qui est plus réaliste (Bravard et Petit, 2000).

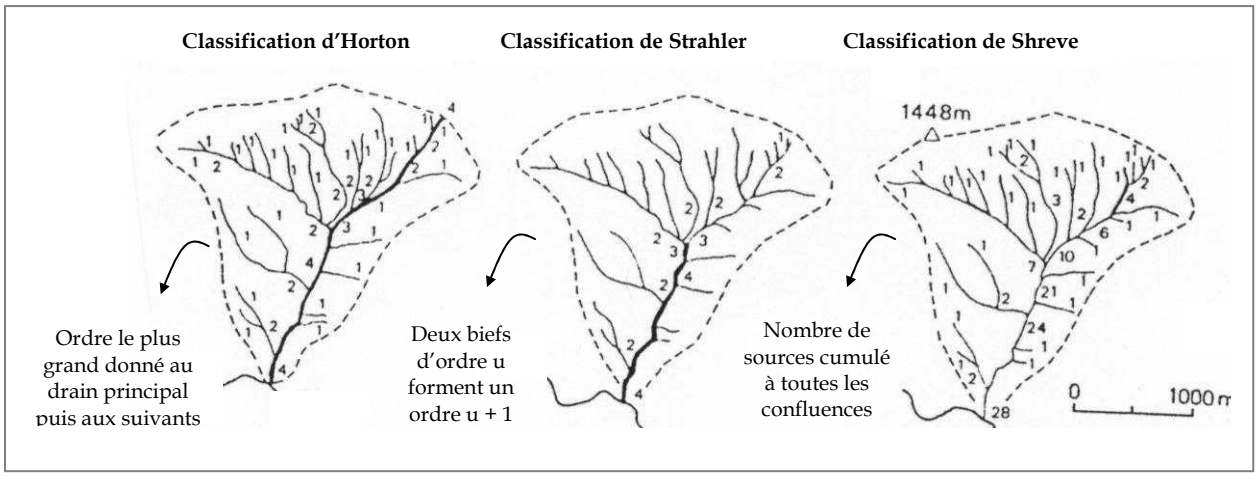


Fig. 7.7. Hiérarchisation des réseaux selon trois méthodes d'ordination (modifié d'après Bravard et Petit, 2000). En gras, figurent les tronçons d'ordre 4 pour chaque méthode.

R.L. Shreve (1966) crée une troisième méthode afin de mettre en évidence la **magnitude** du réseau hydrographique, soit le nombre de sources drainées par une rivière. Le principe est celui de la totalisation, de proche en proche, tout en tenant compte de tous les affluents : on additionne à chaque confluence le nombre de sources débouchant au niveau de cette jonction. Cette méthode est sans doute la meilleure s'il s'agit de chercher une relation entre l'ordination et les volumes d'eau écoulés. Si ces méthodes sont descriptives, elles permettent d'aborder le problème de la structuration interne du réseau (Hauchard, 2001) et ont le mérite d'essayer de quantifier l'organisation fonctionnelle d'un réseau (Delahaye, 2005).

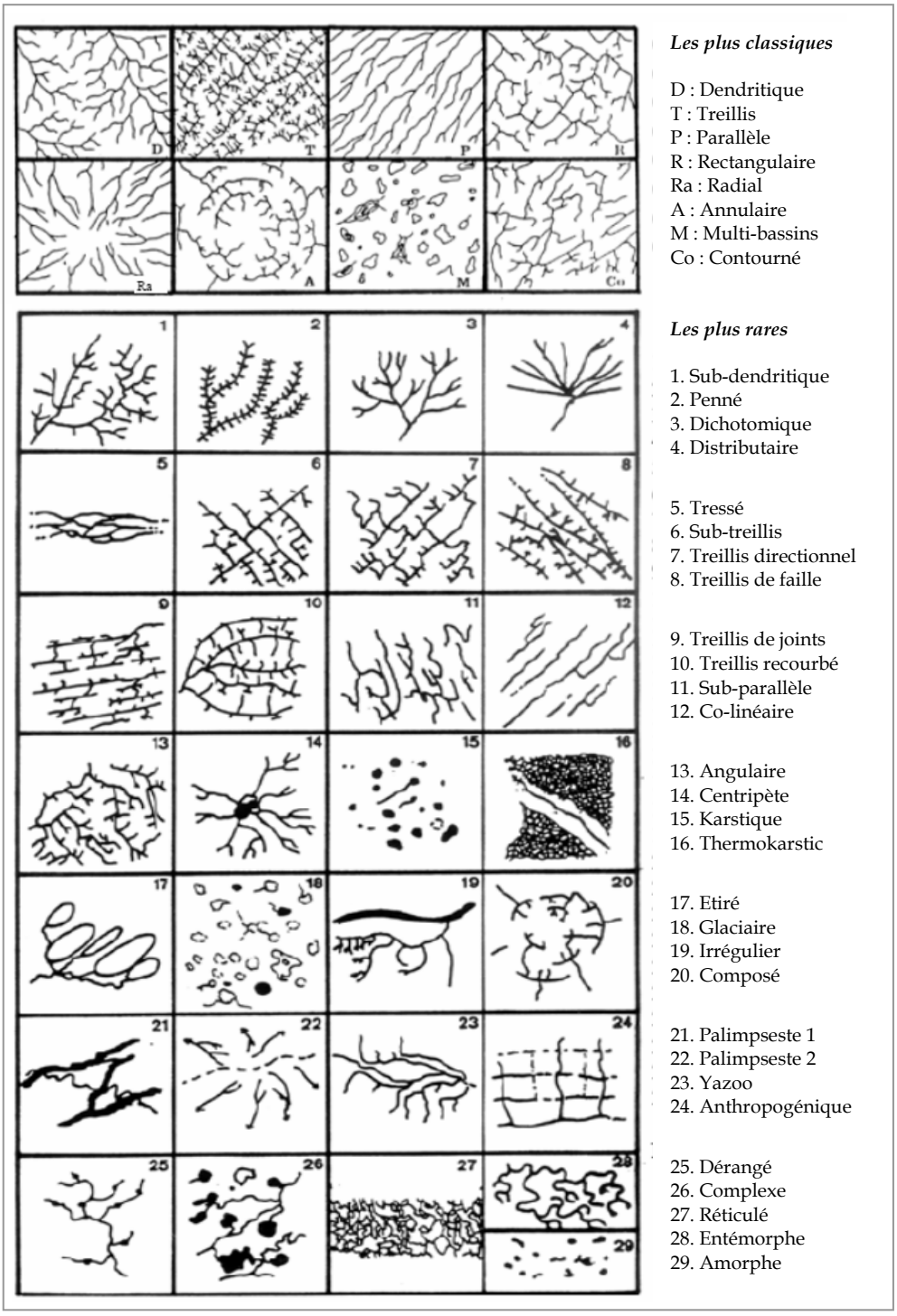


Fig 7.8. Exemples de dénominations usités pour décrire les différents chevelus (Le Pape, 1998).

N°	Nom de l'indice [symbole]	Formule / Equation	Auteurs ou sources	Description / Commentaire
1	Longueur totale du réseau [Lt]	Lt = ∑ Nu	Llamas, 1993	Lt totalise la longueur des drains de chaque ordre (selon les différentes méthodes d'ordination)
2	Rapport de Longueurs, ou indice de hiérarchie [*Rl*]	Rl = L(u) / L(u+1)	Horton, 1945	Rl est le rapport entre les longueurs des cours d'eau d'un ordre (u) et les longueurs des cours d'eau de rang supérieur (u+1).
3	Rapport des longueurs sommées ou cumulées [RL]	RL = ∑ Nu / ∑ N(u+1)	Charleux-Demargne, 2001	RL est le ratio des longueurs sommées des cours d'eau de rang u sur les longueurs cumulées des rivières de rang supérieur u+1.
4	Rapport de bifurcation, ou rapport de confluence [Rb]	Rb = N(u) / N(u+1)	Horton, 1945 Strahler, 1952 Schumm, 1956	Rb est le ratio entre le nombre N de cours d'eau d'un certain ordre (u) et le nombre de cours d'eau de l'ordre immédiatement supérieur (u+1).
5	Rapport de surface ou rapport d'aire [Ra]	Ra = A(u) / A(u+1)	Schumm, 1956	Ra est le rapport entre les surfaces des bassins de rang (u) et celles des bassins de rang (u+1).
6	Rapport de pente [Rp]	Rp = Pm (u) / Pm (u+1)	Horton, 1945 Smart, 1968	Rp est le rapport entre les pentes moyennes d'ordre u et la moyenne des pentes des cours d'eau d'ordre supérieur (u+1).
7	Magnitude [M]	M = umax	Shreve, 1966	La magnitude M est définie comme l'ordre le plus élevé des tronçons du bassin. C'est par conséquent l'ordre du tronçon à l'exutoire.
8	Dimension fractale du réseau [*d*]	*d* = max ((ln(Rb)/ln(Rl))	La Barbera et Rosso, 1989 ; La Barbera et Roth, 1994	*d* est la valeur maximum entre les logarithmes du ratio de bifurcation et du rapport de longueur.
9	Dénivelée du réseau [R]	R = Hmaxréseau - Hmin	Plantier, 2004	R est la différence d'altitude entre le point le plus haut du réseau et l'exutoire.

Tab. 7.3. Noms, formules et sources des indices de réseau couramment utilisés en hydrologie (P = Pente ; A = Surface ; Lb = Longueur maximale du cours d'eau ; u = ordre de chaque tronçon)

R.E. Horton (1945) établit à partir de sa méthode d'indexation deux lois qui montrent les liens entre les niveaux d'organisation des réseaux à travers les échelles.

1 - Le ***rapport de bifurcation*** **Rb**

Ce rapport est obtenu en divisant le nombre *n* de cours d'eau de rang *u* par le nombre de cours d'eau de rang supérieur *u + 1*. A.N. Strahler (1952) renommera cet indice ***ratio de confluence*** (tab. 7.3.). Chez R.E. Horton, **Rb** varie entre 3 et 5, alors que chez Strahler, les valeurs oscillent aux alentours de 4 et chez S.A. Schumm (1957), de 4,7. En d'autres termes, il faut en moyenne 4 cours d'eau de rang 1 pour former un cours d'eau de rang 2, autant de rang 2 pour former un rang 3, et ainsi de suite. Ce ratio de bifurcation démontre une progression géométrique inverse pour le nombre d'éléments d'ordre *u + 1*. Cette loi souligne que les faibles valeurs (< à 2) concernent les bassins peu marqués par des discordances géologiques, alors que les plus fortes valeurs (> à 4) indiquent une complexité structurale plus prononcée, une plus faible perméabilité aux strates de surface (Reddy *et al.*, 2004), ainsi qu'une réactivité aux pluies relativement plus forte (Strahler, 1964 ; Ibisate, 2004).

2 - Le ***rapport de longueur*** **Rl**

R.E. Horton (1932, 1945) établit aussi un **rapport de longueur RL** à partir de la moyenne arithmétique des rivières. Les longueurs moyennes des ordres successifs croissants d'ordre *u + 1* forment une série géométrique normale en fonction de l'accroissement des rivières dans la hiérarchie *u*. Ce ratio varie entre 2 et 3, la moyenne s'établissant à 2,32 chez J.-P. Bravard et F. Petit (2000). M. Morisawa (1959) obtient des valeurs proches de 2,6 en utilisant la taille moyenne du drain principal sur quelques bassins de Little Mill Creek dans l'Ohio (USA). Il convient toutefois d'ajouter que ces deux lois font l'hypothèse de ratios constants à travers les échelles, et qu'ils sont liés par la relation Rl = Rb/RL (Smart, 1981 ; Hauchard, 2001).

Ces deux lois (les lois hortoniennes) sont fondamentales car elles mettent en évidence un lien de proportionnalité entre la taille, le nombre et la structuration des réseaux au sein du bassin. La structure du réseau, une fois représentée sur un graphique semi-logarithmique en ordonnées, permet d'obtenir des droites décroissantes corrélant fréquence et ordre *u* des drains. Les courbes convexes soulignent une forme plus dendritique au milieu tandis que les formes concaves s'expliquent par une absence de confluences entre drains d'ordre supérieur.

D'autres lois vont suivre ces deux lois hortoniennes. J.S. Smart (1968) définit un ***rapport de pente*** avec une relation constante négative entre les pentes des cours d'eau d'ordre *u* et les pentes d'ordre *u + 1*. Les valeurs de cet indice sont comprises entre 1,5 et 3 en fonction de l'accroissement des talwegs. La ***dénivelée du réseau*** complète ce rapport de pente avec la comparaison des différences altitudinales entre des réseaux d'ordre *u* identiques (Plantier, 2004). En s'appuyant sur la classification d'A.N. Strahler, S.A. Schumm (1957) démontre aussi que la surface drainée suit une progression géométrique directe : ce ***rapport d'aire*** est le rapport entre la moyenne de l'aire des sous bassins d'ordre *u* et celle d'ordre *u+1*.

La complexité de la structuration des réseaux amène finalement les chercheurs à se demander si les phénomènes sont distincts à travers les échelles. Plusieurs travaux se sont attachés à quantifier la dimension fractale des cours d'eau en s'appuyant sur les travaux de B. Mandelbrot (1985). P. La Barbera et R. Rosso (1989) calculent la ***dimension fractale des réseaux*** en rapportant le ratio de bifurcation sur le rapport de longueur (tab. 7.3.). Bien qu'un rapprochement semble s'opérer vers la dynamique non linéaire des processus au sein même des cours d'eau (Montgomery et Dietrich, 1988, 1992 ; Beert et Borgas, 1993 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Per Bak, 1999), **ces outils restent encore trop éloignés de la réalité** et ils ne traduisent qu'une évolution moyenne, difficilement transposable à l'échelle locale.

On recense ici **9 indices de réseaux** qui répondent à deux objectifs :
- quantifier le degré d'organisation de réseaux plus ou moins structurés ;
- évaluer la fonctionnalité d'un réseau et son rôle sur la dynamique hydrologique ;

7.2.4. Des indices « *croisés* » combinant deux variables morphologiques

Dans la continuité de leurs premiers travaux, certains chercheurs vont créer des indices plus synthétiques en croisant deux des trois variables morphologiques.

Certains chercheurs vont comparer la surface du bassin (indices de forme) à la structure du réseau. R.E. Horton (1932) définit un indice couramment utilisé : la ***densité de drainage*** (**Dd)**. Cette densité se calcule en rapportant la longueur totale des rivières sur la surface totale d'un bassin. Cet indice est fondamental car il reflète les conditions climatiques locales, le relief ou la géologie (Hirsh, 1962 ; Bravard, 1998 ; Cudennec, 2000 ; Plantier, 2004).

Cet indice permet également de tenir compte du degré de développement et d'incision d'un réseau. La valeur **Dd** est faible lorsque le relief n'est pas très important, mais elle est forte pour des reliefs plus élevés (Vogt *et al.*, 2003).

S.A. Schumm (1956) renverse la formule en calculant la ***constante de maintenance des chenaux*** **Cm**, où il divise la surface par la longueur totale des cours d'eau. Cette variable donne le *« nombre de mètres carrés de bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique de 1 mètre de longueur »* (Zavoianu, 1985 ; tab. 7.4.).

Plusieurs indices vont s'appuyer sur la *densité de drainage*. M.A. Melton (1958) démontre qu'il existe une relation positive avec la ***densité hydrographique*** **Fs** (définie par R.E. Horton comme étant le nombre de talwegs *Nx* par unité de surface), du type $\mathbf{Fs} \alpha \mathbf{Dd}^2$, avec une valeur moyenne α aux alentours de 0,69. B.R. Montgomery et W.E. Dietrich (1992) obtiennent un ratio entre la ***longueur de la zone source*** **Ls** et la ***densité de drainage*** **Dd** qui évolue de manière inverse. Le relation renseigne sur le point de transition entre la phase de dispersion du ruissellement et la phase de concentration des écoulements (Diectrich *et al*., 1993).

On peut également obtenir une ***longueur moyenne de versant*** **Lv** qui correspond à la moitié de la densité de drainage ou un ***nombre de dissection*** en croisant **Dd** avec la dénivelée (tab. 7.4.). L'***indice de finesse*** rapporte la somme des longueurs des cours d'eau au périmètre. G.P.O. Reddy *et al*. (2004) définissent un ***ratio de texture*** **Rt** qui croise le périmètre avec le quotient du nombre de cours d'eau de premier ordre au sein du bassin versant. J.L. Hack (1973) propose une ***densité de confluences*** **Dc** qui lui permet de quantifier la structure des réseaux en fonction de la densité de drainage (Font, 2002) : un réseau en treillis se distingue par une densité de confluence plus élevée qu'un réseau en parallèle.

Une loi d'échelle va rapidement émerger du rapport entre la surface d'un bassin et la longueur des cours d'eau. Dans sa courbe hydrodynamique, Ch. Péguy (1942) met en avant un rapport d'échelle entre le relief et l'agent d'érosion principal, à savoir la quantité d'eau qui s'écoule sur celui-ci. C'est finalement J.L. Hack (1957) qui donne suite à cette observation en créant un ratio entre la surface du bassin et la longueur du drain principal (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997), du type $\mathbf{Lm} = 1{,}4\ \mathbf{A}^h$. L'exposant peut varier de 0,5 à 0,6 en fonction de la taille du bassin, avec une moyenne de 0,565 (Hauchard, 2001). J.E.Mueller (1973) obtient des valeurs de 0,6 pour les bassins inférieurs à 8000 miles², de 0,5 pour ceux dont la taille est comprise entre 8 et 150000 km², contre 0,46 pour les bassins supérieurs. M. Gray (1961) arrive à une relation moyenne de type $\mathbf{Lm}\ \alpha\ A0{,}568$ pour des bassins de grande taille (10 000 km²), tandis que D.R Montgomery et W.E.Dietrich (1992) trouvent des indices proches de 0,5.

D'autres chercheurs créent des indices pour comparer la surface du bassin à son volume. C. Puech (1993) crée ainsi un **indice global de pente IPB** qui rapporte la dénivelée séparant les altitudes ayant 5 et 95% de la surface d'un bassin au dessus d'elles, avec la longueur L du rectangle équivalent. K. Beven *et al.* (1997) créent un **index topographique TI** ou **TIP** qui leur permet de rapporter l'aire contributive d'un bassin à la pente locale relevée à l'échelle du pixel. Cet indice sert à caractériser les zones saturables en eau du bassin dans TOPMODEL, mais d'autres applications sont également possibles, et notamment pour mesurer le degré de convexion ou de concavité des versants (Ibbitt et Woods, 1997 ; Germaine *et al*., 2007).

En revanche, peu d'indices de volume ont été croisés à des indices de réseaux : l'**indice de pente du réseau**, où on rapporte la dénivelée à la longueur de chaque segment de cours d'eau (Zavoianu, 1985), est le seul indice recensé dans les ouvrages hydrologiques (tab. 7.4.).

N°	Nom de l'indice [symbole]	Formule / Equation	Auteurs ou sources	Description / Commentaires
1	**Densité de drainage** [Dd]	Dd = (∑Lt) / A	Horton, 1932	**Dd** est la somme des longueurs totales Lt des cours d'eau rapportée à la surface du bassin versant.
2	**Indice de finesse** [Rf]	Rf = (∑Lt) / P	Jena et Tiwori, 2006	**Rf** est le rapport entre la somme des longueurs totales du réseau et la longueur du périmètre P.
3	**Constante de maintenance ou de stabilité des chenaux** [Cm]	Cm = A / Lt	Schumm, 1956	**Cm** est le rapport entre la surface du bassin et la longueur totale des chenaux (inverse de Dd).
4	**Fréquence ou densité hydrographique** [Fu ou Fs]	1 = Nt / A 2 = 0,694 Dd^2	1 : Horton, 1945 2 : Melton, 1957	**Fu** ou **Fs** est le ratio entre le nombre total de drains et la surface A du basin.
5	**Nombre de dissection** [Rn]	Rn = Bh * Dd	Reddy *et al,* 2004	**Rn** est le produit de la dénivelée du bassin par la densité de drainage.
6	**Ratio de texture** [Tr]	Tr = N(u=1) / P	Reddy *et al,* 2004	**Tr** est le quotient du nombre de cours d'eau de premier ordre sur le périmètre du bassin.
7	**Longueur de la zone source** [Ls]	Ls = 1 / Dd	Montgomery et Dietrich, 1992	**Ls** est l'inverse de la densité de drainage.
8	**Relief relatif** [Rp]	Rp = Rb/Lp	Jena et Tiwari, 2006.	**Rp** est le ration entre le dénivelé et la longueur du périmètre, Lp.
9	**Longueur moyenne de versant** [Lv]	Lv = ½ Dd	Montgomery et Dietrich, 1992	**Lv** est la moitié de la densité de drainage.
10	**Loi d'échelle ou loi de Hack**	$Lm = 1{,}4\ A^h$	Hack, 1957 Melton, 1957	La loi d'échelle met en relation la surface du bassin et la longueur maximale du cours principal
11	**Indice global de pente** [IPB]	$IPB = Bh_{(5\text{-}95)} / L$	Puech, 1993	**Ig** rapporte la dénivelée séparant les altitudes ayant 5 et 95% de la surface du bassin au dessus d'elles, sur la longueur L du rectangle équivalent.
12	**Longueur plane du bassin** [L]	L = d (Hmin – G)	Snyder, 1932 (*in* Zavoianu, 1985)	**L** est la longueur curviligne mesurée sur le cours d'eau principal depuis l'exutoire (Hmin) jusqu'au centre de gravité G.
13	**Densité de confluences** [Dc]	Dc = Nc / A	Font, 2002	**Dc** est le rapport entre le nombre de confluences et la surface du bassin.
14	**Indice de pente du réseau** [IPH]	IPH = ∑ Bhi / ∑ Li	Hack, 1973	**IPH** est le rapport entre la somme de la dénivelée et la somme de la longueur de chaque segment du cours d'eau.
15	**Index topographique** [TI ou TPI]	TI = log (A/ β)	Beven, 1997	**TI** est le rapport logarithmique entre l'aire contributive locale et la pente locale calculé pour chaque pixel (après maillage du bassin).
16	**Nombre de rugosité** [Rn]	Rn = H/Dd	Jena et Tiwori, 2006	**Rn** est le produit du relief par la densité de drainage Dd.

Tab. 7.4. Noms, formules et sources des « *indices croisés* » couramment utilisés en hydrologie (P = Pente ; A = Surface ; Lb = Longueur maximale du cours d'eau ; u = ordre de chaque tronçon)

On recense finalement **16 indices « *croisés* »** qui traduisent la volonté des chercheurs de créer des indices à vocation plus synthétique, et en particulier en comparant deux variables morphologiques. Si on fait un bilan sur tous les indices recensés, **63 indices** se répartissent en **quatre catégories bien distinctes** (fig. 7.9.).

Fig. 7.9. Typologie des 63 indices morphométriques classés en 4 catégories (Douvinet *et al.*, 2008)

7.3. Limites d'utilisation des méthodes classiques

Paradoxalement, si ces indices foisonnent dans la plupart des ouvrages hydrologiques, et si leur utilisation a permis d'affiner la caractérisation des bassins touchés dans le chapitre 5, la relation entre la morphométrie et la dynamique de la réponse hydrologique est, en partie, **sujette à caution** (Bardossy et Schmidt, 2002 ; Bendjoudi et Hubert, 2002 ; Delahaye, 2003).

7.3.1. Héritage d'une géomorphologie structurale descriptive

Certains problèmes sont liés à la date de construction des indices. Les géomorphologues ont imaginé des méthodes de plus en plus ingénieuses pour mesurer la forme d'un bassin, son volume ou la structuration d'un réseau hydrographique. Pourtant, la plupart des outils, créés sur la période 1940-1970, témoignent d'une **morphométrie profondément ancrée dans une géomorphologie structurale avant tout descriptive.** Cette dernière s'est ensuite écartée de la morphométrie en se concentrant sur le suivi des processus érosifs élémentaires à petite échelle (Maire, 1996). Les méthodes classiques appréhendent les **caractéristiques statiques** des bassins versants, dans un espace plan à deux dimensions (2D) où il était plus facile de les décrire face à la complexité des processus qui s'y passent. « *Ces indices n'ont jamais considéré la dynamique hydrologique qui reste difficilement mesurable* » rappelle C. Gaucherel (2003).

Les indices se sont surtout basés sur les cartes topographiques qui étaient les seuls outils disponibles avant 1970 (Moniod, 1983). Le périmètre et la superficie des bassins étaient ainsi **calculés par planimétrie à l'aide d'un curvimètre**. Or, des études récentes ont remis en cause la fiabilité d'une telle démarche. En raison de la fractalité des limites d'un bassin versant ou de son réseau, il devient nécessaire d'adapter l'échelle de mesure pour une bonne estimation des indices morphométriques (Breyer et Snow, 1992 ; Bardossy et Schmidt, 2002). Quand la résolution du MNT (Modèle Numérique de Terrain) augmente, l'indice de compacité tend à s'accroître (Bendjoudi et Hubert, 2002) et, de manière concomitante, l'indice de circularité de Miller diminue. **La valeur des indices apparaît ainsi dépendante de l'échelle de mesure.**

7.3.2. Critiques vives de la part des géomorphologues français

La géomorphologie française s'est rapidement démarquée des travaux américains, russes et anglo-saxons à cause d'une relative méfiance face aux chiffres et de **l'aspect simplificateur de certains indices** (Maire, 1996 ; Derruau, 1996 ; Hauchard, 2001 ; Delahaye, 2002).

Certains auteurs vont violemment **critiquer la morphométrie** : « *les indices sont d'un grand secours à condition que leur utilisation s'applique sur des bassins simples et connus* » écrit H. Baulig (1959). « *Au morphologue de sentir lui-même quand un chiffre est véritablement expressif et quand il n'est que l'expression inutilement compliquée d'une réalité simple* » (Derruau, 1996). Pour P. Birot (1955), les indices d'Horton ne servent qu'à confirmer certaines « *lapalissades géométriques* », et J. Tricart (1991) qualifie les lois de réseaux de « *lois banales* ». R. Lambert (1996) va encore plus loin en écrivant qu' « *il s'agit de géométrie, de géométrie plane, et non de géographie* ».

A force de vouloir être applicable sur tous les bassins (Pinchemel, 1954 ; Zavoianu, 1985), on remarque que la morphométrie a perdu une partie de son objectivité. Ces méthodes sont

d'autant plus éloignées de la réalité qu'elles traduisent un **comportement général** du bassin, valable uniquement à l'échelle mensuelle. **C'est sans doute pour cette raison que les indices sont devenus de simples outils de présentation dans les ouvrages hydrologiques.** La place qu'ils y occupent étant, à cet égard, très révélatrice.

7.3.3. Problèmes liés à une approche « *cloisonnée* », « *statique* » et « *séparée* »

Chacune des composantes morphologiques (forme, volume, réseau) est caractérisée par un indice qui lui est propre. Cependant, une telle approche « *cloisonnée* » et « *séparée* » limite considérablement l'intérêt des résultats (Delahaye, 2002 ; Delahaye *et al.*, 2007).

La forme d'un bassin peut être compensée par l'organisation du réseau ou par le système de pentes. Pour des bassins ayant des compacités identiques, la structuration des cours d'eau est bien plus importante (Strahler, 1964), d'autant plus que l'indice de compacité ne traduit pas l'orientation du bassin par rapport à l'exutoire (Bardossy et Schmidt, 2002). Deux bassins peuvent ainsi avoir une forme différente mais occuper un espace identique, ce qui va donner un indice de compacité **Kf** similaire, mais un temps de concentration **Tc** différent (fig. 7. 10.). Les indices d'allongement ou les indices d'étalement abordent aussi la forme du bassin dans une dimension plane qui ne prend pas en compte le dynamisme imposé par le relief.

Les indices de volume présentent les mêmes limites. Bien que la courbe hypsométrique donne un bon résumé de l'état de maturité d'un bassin, dans une vision purement cyclique, les valeurs de la pente moyenne **Bm**, l'altitude moyenne **Hmoy** ou l'indice global de pente **Ip** sont, au contraire, trop réducteurs. La dissection du relief peut en effet être différente pour des reliefs ayant même surface moyenne et même pente réelle mais présentant des volumes inégaux (fig. 7.10.). Des reliefs très écrasés et non disséqués, de faible volume et de faible pente moyenne, ne doivent pas non plus être confondus avec des reliefs découpés, de fort volume et de forte pente moyenne (Delcaillau, 2004). On peut aussi étudier des bassins aux volumes montagneux similaires, mais qui ont des substrats (crayeux, argileux ou schisteux) qui ne vont pas répondre de la même manière à une entrée pluviométrique identique.

Les indices de réseaux ne sont pas non plus exempts de toute critique. Même si un réseau est bien hiérarchisé, la réponse hydrologique peut être amoindrie par des pentes faibles, ou par une forme plus allongée du bassin (fig. 7.10.). La représentation du drain principal **Bm** pose par ailleurs des problèmes dans les méthodes d'ordination car elle nécessite un choix de la part du géographe pour faire passer telle ou telle rivière à un niveau supérieur (cf. chapitre 5). Le numérotage des rivières ne peut se résoudre que d'une manière arbitraire (Bravard et Petit, 2000). En fonction de l'échelle de mesure, les réseaux ne débuteront pas non plus au même endroit, et des ramifications supplémentaires observées à petite échelle peuvent ainsi perturber l'ordination (Dietrich *et al*, 1993 ; Crave, 1995 ; Charleux-Demargne, 2001).

Les lois hortoniennes trahissent des lois puissances vérifiées sur la plupart des réseaux, et l'ordre y joue tout simplement le rôle de facteur d'échelle (Cudennec, 2000 ; Hauchard, 2001 ; Delahaye, 2002). Les rapports de longueur, de bifurcation et d'aire ne sont également fiables qu'en milieu lithologique homogène (Chorley, 1972).

En effectuant une comparaison entre plusieurs indices morphométriques, T. Hirsh (1962) ne trouva d'ailleurs aucune relation entre le débit et l'aire sur plusieurs bassins du sud de la France. A. Christofoletti (1970) aboutit aux mêmes conclusions sur des bassins brésiliens.

L'apparition des indices « *croisés* » a initié la **recherche d'outils plus synthétiques** mais des lacunes sont aussi mentionnées dans les études y faisant référence. L'organisation d'un réseau hydrographique peut prendre différentes formes pour une densité de drainage **Dd** ou pour une longueur du drain principal identique, ce qui remet en cause la valeur **Dd**, et par conséquent tous les indices qui en dépendent. Les critiques précédentes (des indices plans, peu faciles à interpréter, essentiellement descriptifs) sont également valables pour ces indices « *croisés* » car ils rapportent, à chaque fois, deux des trois composantes morphologiques sans jamais combiner l'ensemble des trois variables (fig. 7.10.).

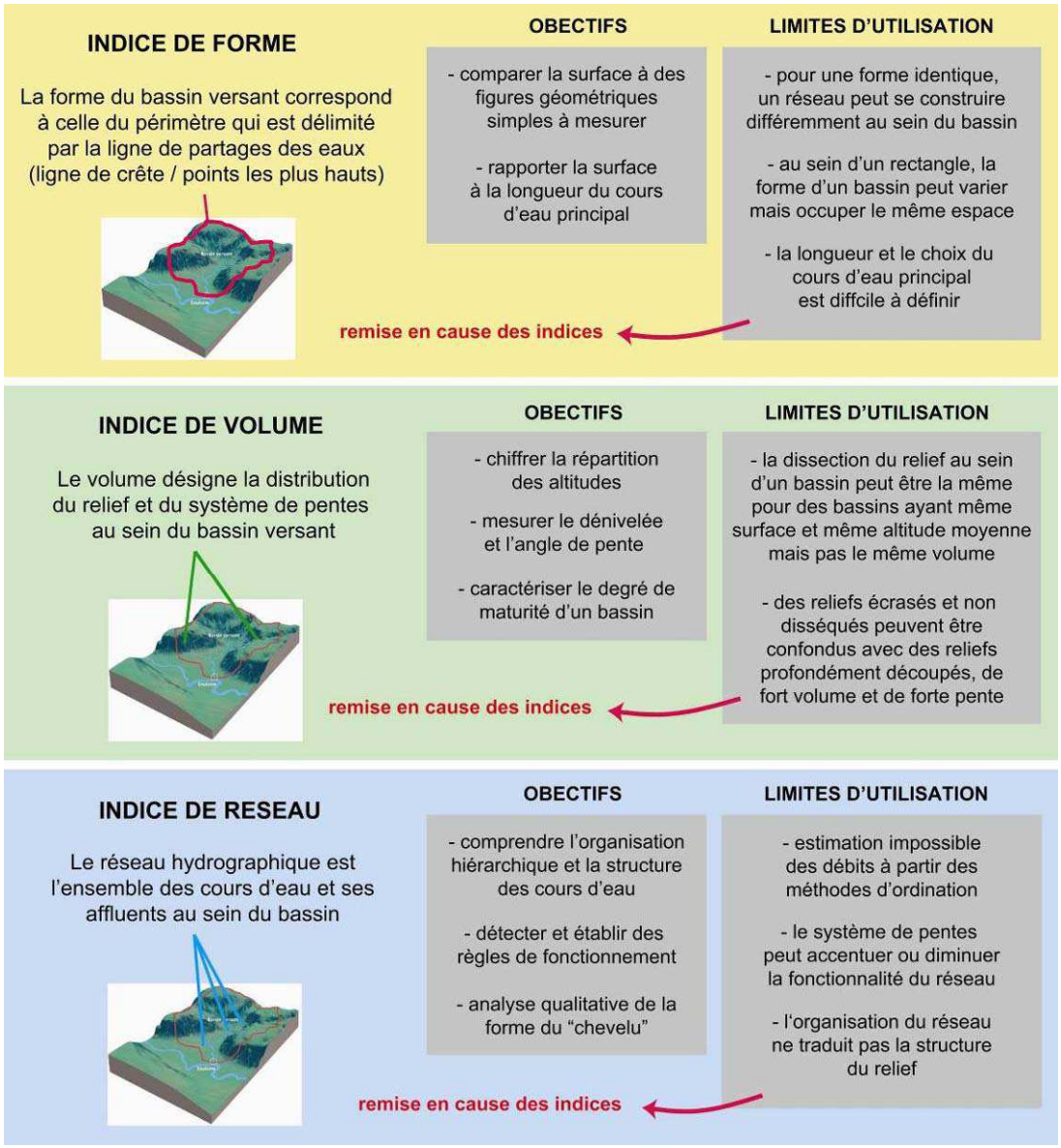


Fig. 7.10. Objectifs et limites d'utilisation pour les trois types d'indices (Douvinet *et al.*, 2008).

Finalement, chaque indice, s'il est étudié indépendamment des autres, ne suffit pas pour traduire l'influence dynamique de la morphologie. Il faut alors se tourner vers des **méthodes plus synthétiques** pour mesurer les effets combinés de la forme d'un bassin, de son système de pentes et de l'organisation de son réseau hydrographique.

7.4. Orientation vers des méthodes plus synthétiques

Plusieurs approches ont été développées pour évaluer la fonctionnalité de la structure d'un réseau au sein d'un bassin versant (Beven *et al*, 1988 ; Crave, 1995 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Cudennec, 2000). Toutes ces approches témoignent d'une orientation vers des méthodes plus synthétiques et elles aboutissent à des conclusions majeures.

7.4.1. Règles de développement et modèles d'organisation des réseaux

Des chercheurs ont tenté de mettre en évidence les **règles de développement des réseaux** ainsi que les lois qui président à leur organisation. Ces règles ne sont pas simples car la taille du cours d'eau n'est pas proportionnelle au volume écoulé et la dynamique du réseau est principalement due aux évènements extrêmes. Deux **grands mécanismes**, mis en opposition, déterminent les transferts d'eau et de sédiments (Dietrich *et al*., 1993) :

- la **dispersion**, qui apparaît sur les versants ;
- la **convergence**, qui concentre les écoulements vers les fonds de talwegs.

Leur point d'équilibre donne ainsi naissance à un cours d'eau (fig. 7.11.).

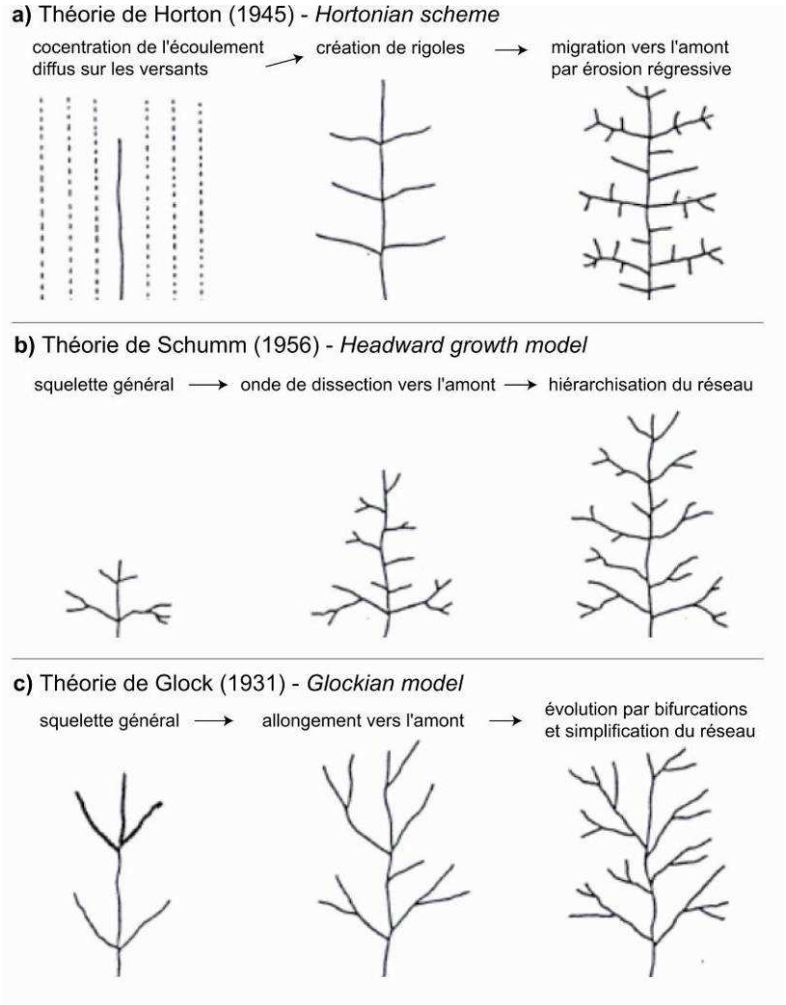


Fig. 7.11. Trois modèles de croissance pour caractériser l'évolution du réseau.

Différentes théories ont été proposées par Glock (1931), Horton (1945) et Schumm (1956). La communauté scientifique s'accorde pour donner raison à ces trois théories qui coexistent dans des contextes locaux et à des échelles différentes (fig. 7.11. ; Cudennec, 2000 ; Delahaye, 2005). L'orientation géographique est une contrainte majeure, surtout en cas d'adaptation du réseau aux contraintes structurales, lithologiques et tectoniques.

Les processus déterminant la genèse et la structure des réseaux sont à la fois complexes et interdépendants. Certains sont considérés comme **aléatoires** ; d'autres comme **déterministes** (Cudennec, 2008). En fonction des hypothèses et des raisonnements théoriques choisis, les auteurs ont proposé différents modèles d'organisation (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo,1997) :

- les **modèles évolutifs** : ils se basent sur une dispersion des réseaux à échelle fine. Le modèle « *invasion percolation model of drainage network* » développé par R. Stark (1991) est construit à partir de règles similaires au phénomène de percolation ;

- les **modèles auto-organisés** : ils mesurent, comme par exemple l'OCN (*Optimal Channel Network)* les écarts entre un réseau théorique et un réseau réel. Trois principes conduisent à la structuration de ces réseaux : la dissipation d'énergie est minimale dans chaque bief, constante, et minimale à l'échelle globale du bassin (Rinaldo *et al*., 1992 ; Ibitt, 1997) ;

- les **systèmes dissipatifs** : ils sont basés sur un état critique d'auto-organisation, ou SOC (*Self-Organized Critically)*. Le réseau est toujours en état d'équilibre, revenant à un état initial après une phase brutale d'activité (Stark, 1991 ; Bak, 1999).

Ces modèles tentent finalement de décrire **l'agencement** des réseaux hydrographiques en se basant sur des raisonnements topologiques, statistiques ou évolutifs. **Ils montrent que les processus morphogéniques coexistent avec des processus aléatoires.**

7.4.2. Lois de distribution des biefs

Les rapports de R.E. Horton analysent la **distribution statistique** des tronçons moyens, mais ils ne caractérisent en aucun cas leur distribution spatiale (Delahaye, 2005).

Un certain nombre de travaux se sont alors intéressés à la distribution des longueurs des biefs (tronçons individuels d'un réseau) afin de mesurer l'**efficacité de l'organisation d'un réseau** (Crave, 1995 ; Bak, 1999). Les résultats montrent que des règles apparaissent pour les petits biefs, mais la distribution des confluences reste globalement le fruit du hasard.

R.L. Shreve (1966) est le premier à envisager cette **distribution aléatoire** en postulant qu'en l'absence de contrôle géologique, les réseaux ont la même probabilité d'occurrence pour un certain nombre de sources donné. Il s'intéresse à l'**agencement du réseau sans contrainte environnementale**, et propose de compter le nombre de combinaisons possibles à partir d'un nombre de sources donné : le TDCN, « *Topologically Distinct Channel Networks* » :
- pour une ou deux sources, une seule combinaison est possible (tab. 7.5.) ;
- pour trois sources, deux solutions sont possibles ;
- pour 4 sources, on a 5 possibilités ;
- pour 5 sources (fig. 7.12.), on a 14 combinaisons envisageables (fig. 7.12.).

Le nombre de combinaisons possibles augmente ainsi de manière exponentielle pour une faible augmentation du nombre de biefs (tab. 7.5., Shreve, 1974 ; Hauchard, 2001).

Nombre de sources	Nombre de combinaisons
1	1
2	1
3	2
4	5
5	14
10	4862
20	$1{,}767\ 10^{9}$
50	$5{,}095\ 10^{26}$
100	$2{,}275\ 10^{56}$

Tab. 7.5. Nombre de combinaisons possibles pour l'agencement d'un réseau en fonction d'un nombre de sources donné (d'après Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997).

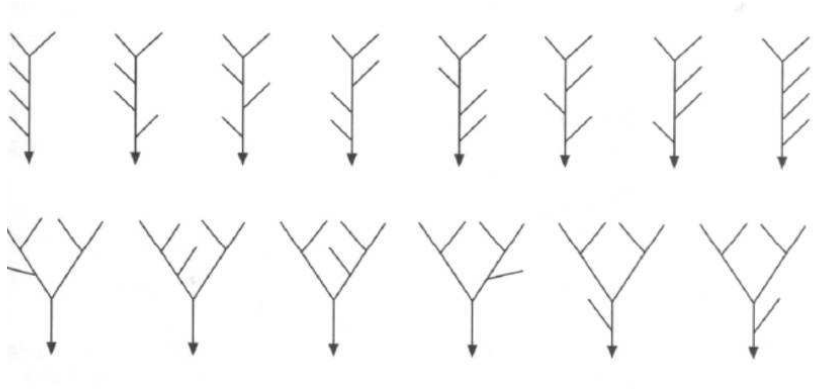


Fig. 7.12. Les 14 combinaisons possibles pour l'agencement d'un réseau à 5 sources.

Cette approche confirme que la **composante topologique est bien présente dans les lois géomorphologiques**, et que **le poids du hasard domine dans le développement des réseaux en dehors de toute contrainte géologique**. Peu de réseaux coïncident pourtant dans la réalité avec ce schéma théorique proposé par le *TDCN* (Abrahams, 1984 ; Crave, 1995).

7.4.3. Fonction-largeur et fonction aire-distance

L'agencement du réseau est fondamental car il permet d'estimer le temps de transit de l'eau depuis les zones sources situées en amont du bassin jusqu'à l'exutoire (Lambert, 1996). Allant dans ce sens, des **fonctions géomorphologiques** exprimées par rapport à la distance à l'exutoire ont fait l'objet de nombreuses investigations (Cudennec, 2000).

Des travaux ont abordé la complexité de l'organisation du réseau en étudiant la « *fonction de distribution de l'aire contributive suivant la distance à parcourir* » (Snell et Sivapalan, 1994)**.** La « *fonction largeur W(x)* », ou la « *width function* » (Shreve, 1969), indique le nombre de biefs **N** du réseau en fonction de la distance *x* à parcourir par la goutte d'eau la plus éloignée pour parvenir jusqu'à l'exutoire. R.L. Shreve (1974) calcule le nombre de points tous les kilomètres et reporte sur le graphique les valeurs N(x) obtenues (fig. 7.13.). Cette distribution est proche du *Link Frequency Distribution (LKD)* proposée par K. Kirkby (1976) ; **elle décrit l'influence de la forme d'un bassin par l'évolution de sa largeur** (fig. 7.14.).

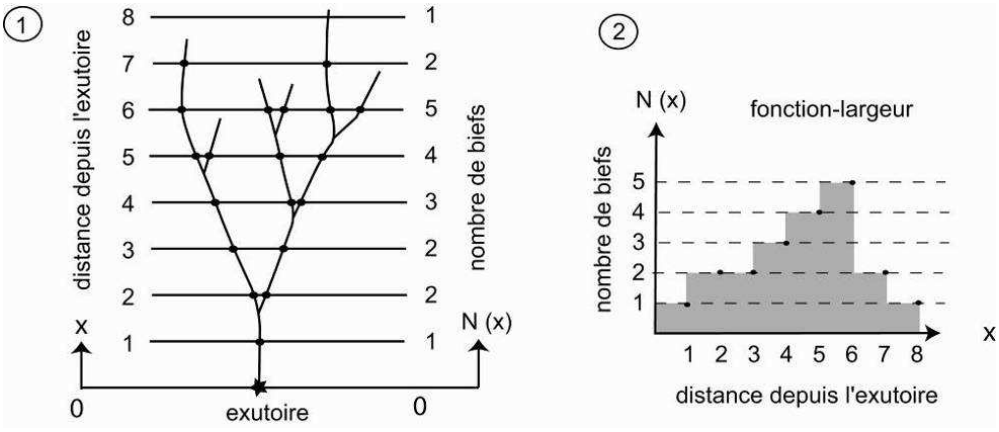


Fig. 7.13. Méthode de construction de la « *width function* ».

Bien que graphique, la « *fonction-largeur* » donne une bonne idée, rapide et synthétique, de l'allure du bassin versant et de la densité du réseau. Cette approche prend en compte la **réelle trajectoire des écoulements**, et non plus simplement la longueur moyenne du drain principal comme le faisaient les indices de forme de R.E. Horton. Elle constitue les premiers pas vers une **analyse spatiale de l'organisation fonctionnelle d'un réseau hydrographique** (Delahaye, 2002). Elle fait surtout le lien entre la géomorphologie et l'hydrologie : « *Cette grandeur correspondant à la distance entre les limites du bassin versant, perpendiculairement à un diamètre correspondant à l'axe majeur de l'éloignement de l'exutoire*» (Cudennec, 2008).

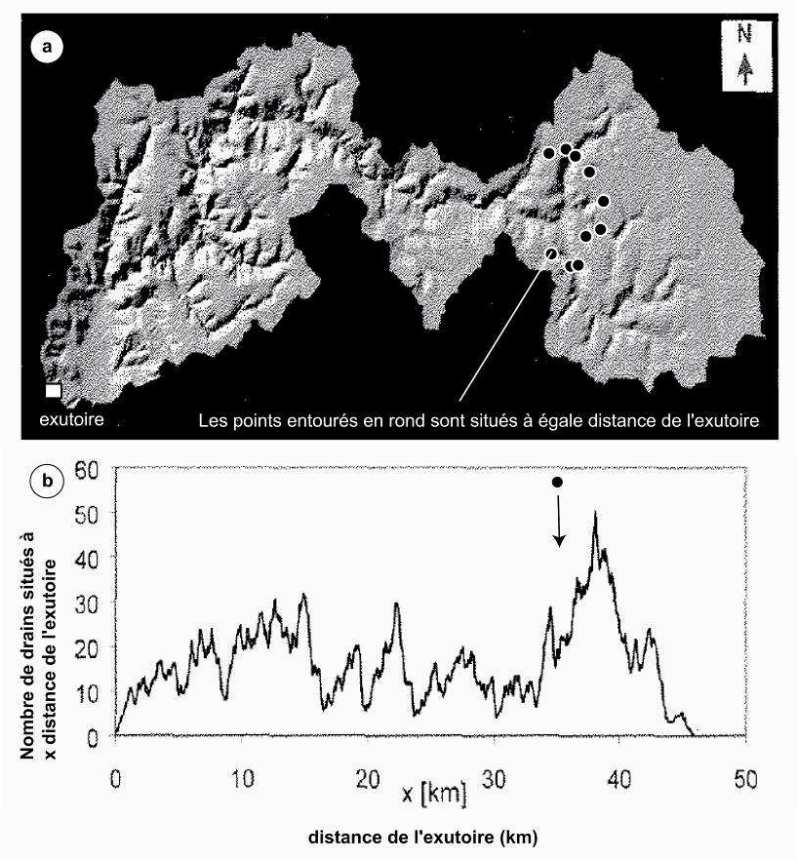


Fig. 7.14. Représentations de la « *width function* » de Shreve (1969) sur le bassin du Wando (Richards-Perou, 2002) : un outil graphique pour traduire l'évolution de la forme d'un bassin.

La « *fonction-largeur* » est néanmoins un **outil graphique** qui ne permet pas d'obtenir une mesure de l'organisation interne du bassin (Delahaye, 2002). Cette remarque est valable pour d'autres applications qui ont été menés sur le même principe, notamment pour les modèles basés sur les systèmes neuronaux. Les modèles RTM (*Random Topologic Model)* de R.L. Shreve (1966) a, par exemple, servi de point de départ au **modèle Q** qui mesure la distribution des biefs intérieurs et extérieurs d'un réseau (fig. 7.15.). Les biefs intérieurs ont la valeur 1 tandis que les biefs extérieurs la valeur 0 (soit l'inverse des méthodes classiques). Ce codage binaire identifie la structure du réseau (Costa-Cabral et Burges, 2002) mais ces méthodes ne peuvent quantifier les contributions de chacun des biefs au comportement global du bassin (fig. 7.15.).

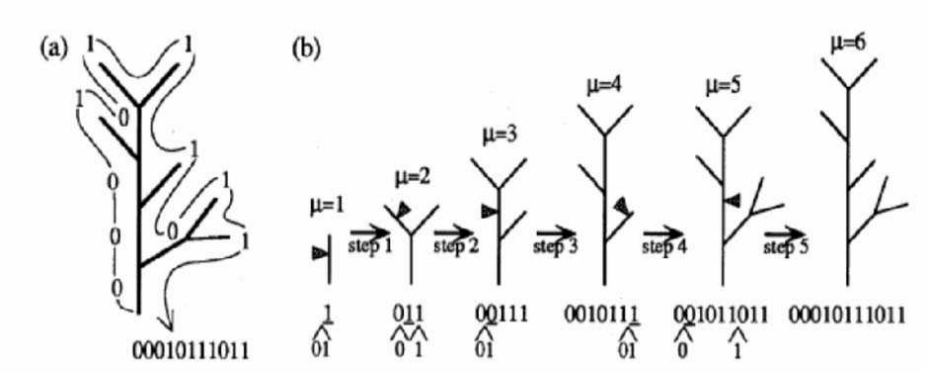


Fig. 7.15. a) Représentation de la topologie du réseau par la méthode de Lukasiewicz (0 pour un bief extérieur ; 1 pour un bief intérieur) ; b) méthode de construction (Oguz, 2001).

Une des améliorations apportées à la « *fonction-largeur* » est l'intégration des surfaces à la structure du réseau : R. Snell et S.V. Sivapalan (1994) appellent cette fonction « *fonction-aire* », fonction que I. Rodriguez-Iturbe et A. Rinaldo (1997) désignent par « *fonction aire-distance* ». Ces auteurs considèrent que la « *fonction aire-distance*» contient des informations primordiales sur la relation qui existe entre le **réseau** et les **versants** à travers toutes les **échelles** du bassin. Elle renseigne sur les mécanismes de développement d'un réseau dans une forme donnée et elle associe les temps de séjour de l'eau à la surface du bassin (Crave, 1995 ; Cudennec *et al.*, 2004). Cette fonction est assimilée à la « *fonction largeur* » puisque « *dans un système où un bief est associé à chaque élément de surface unitaire utilisé pour discrétiser la surface du bassin versant, la fonction largeur et la fonction aire distance sont égales* » (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997).

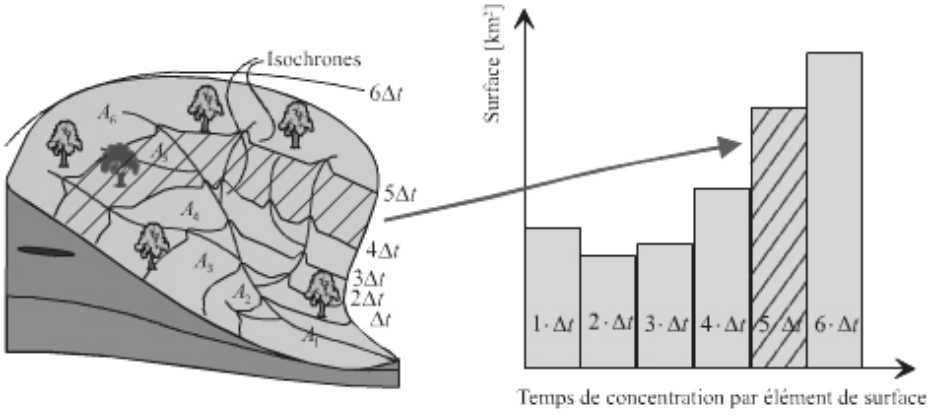


Fig. 7.16. Méthode de construction de la « *fonction-aire normalisée* » : pour chaque isochrone, on définit une vitesse d'écoulement et un temps de séjour (d'après le modèle HYDRAM).

Ces derniers utilisent une maille carrée pour calculer la « *fonction-aire* » qui correspond à la proportion de pixels exprimée en fonction de la distance à l'exutoire (fig. 7.16.). Le nombre de pixels est converti en aire en multipliant ce nombre par la superficie unitaire d'un pixel. On parle de « *fonction-aire normalisée* ». K.Beven (2003) critique toutefois l'utilisation d'images *raster* pour de tels traitements car la fonction est alors dépendante de l'échelle de mesure.

En considérant une vitesse d'écoulement constante au sein du bassin, on peut convertir la « *fonction-aire* » en « *diagramme surface-temps* » (Cudennec, 2000 ; Richards-Pécou, 2002). L'axe des abscisses devient une unité de temps et non de surface. Cette fonction est importante car elle permet d'identifier les contributions spatiales et temporelles des sous bassins par rapport à la réponse globale mesurée à l'exutoire. « *Cette fonction traduit les caractéristiques essentielles de la réponse hydrologique en raison de la relation avec la distribution des temps de séjour au sein du bassin* » rappelle également C. Cudennec (2000).

La « *fonction aire-distance* » témoigne finalement d'une orientation vers des méthodes plus synthétiques en associant forme, réseaux et surfaces (Rinaldo *et al*., 1992 ; Rodriguez-Iturbe *et al*. 1992 ; Cudennec *et al*., 2004). **Elle permet surtout de mieux appréhender la dynamique de la réponse hydrologique à échelle fine, en identifiant la part des contributions internes, alors que les méthodes classiques se sont souvent limitées à l'échelle globale du bassin.**

Conclusions du chapitre 7

Cet état des lieux met à jour la **multitude des outils disponibles** pour aborder l'influence de la morphologie sur la dynamique hydrologique des bassins versants.

► À quelle période et dans quel but les indices ont-ils été créés ?

La morphométrie a vu le jour à la fin du XIX^{ème} siècle et les indices n'ont cessé d'être conçus au cours du XIX^{ème} siècle. L'objectif général était de pouvoir comparer les bassins versants de taille différente en utilisant des indices **simples, rapides** et **faciles à calculer**. Les finalités ont évolué au cours du temps. Les travaux de A. Christofoletti (1970) marquent un tournant capital. Toutes les études morphométriques futures vont systématiquement relier les indices aux caractéristiques lithologiques du milieu. Certains indices apparaissent comme des outils de référence en hydrologie et leur apport est considérable. Les lois d'Horton, les indices de forme (compacité, étalement), la courbe hypsométrique… sont encore aujourd'hui couramment utilisés en hydrologie.

► Est-il possible de proposer une typologie des indices suivant les différentes variables morphologiques étudiées (forme, volumes, réseaux) ?

Les **69 indices recensés** peuvent être divisés en quatre catégories :

- **16 indices de forme** qui s'attachent à décrire la forme et l'allongement du périmètre ;
- **22 indices de volume** pour caractériser la distribution du relief par un indice « *moyen* », révélateur des caractéristiques internes du bassin versant et de son évolution structurale ;
- **9 indices de réseau** pour décrire l'organisation des réseaux hydrographiques ;
- **16 indices « *croisés* »** qui combinent deux des trois variables morphologiques.

► Pourquoi la relation entre la morphométrie et l'hydrologie est-elle, en partie, sujette à caution ? Quelles sont les critiques et les limites d'utilisation évoquées ?

La classification souligne justement le fait que les indices décrivent, de manière séparée, chacune des composantes. Cette approche « *cloisonnée* » limite considérablement l'intérêt des résultats et chaque indice, s'il est étudié indépendamment des autres, est insuffisant pour traduire l'influence dynamique de la morphologie dans sa globalité.

D'autres limites sont évoquées dans la littérature hydrologique. La plupart des indices, créés entre les années 1930 et 1960, témoignent d'une morphométrie profondément ancrée dans la **géomorphologie structurale essentiellement descriptive**. Les indices ont également été calculés à partir des cartes topographiques, seuls outils disponibles avant les années 1970, dont l'utilisation a été abandonnée car certaines valeurs dépendent trop fortement de l'outil de mesure. A force de vouloir être applicable sur tous les bassins versants, la morphométrie a perdu une partie de son objectivité. La place (en préambule) que les indices occupent dans les ouvrages hydrologiques est, à cet égard, très révélatrice.

► Peut-on traduire la dynamique de la réponse hydrologique d'un bassin en utilisant des indices à la fois synthétiques et dynamiques ?

Différentes méthodes existent. La « *fonction aire-distance* » est la plus **synthétique** car en décrivant la forme d'un bassin par l'évolution de sa largeur, elle prend en compte la réelle trajectoire des écoulements, intègre la surface à travers les versants, et elle traduit surtout la fonctionnalité de l'organisation interne d'un réseau de manière dynamique. **Néanmoins, ces méthodes traduisent toujours l'influence de la morphologie à l'échelle globale des bassins versants. On mesure ainsi son comportement à l'exutoire, sans chercher à savoir comment cette réponse se construit à une échelle intra-bassin.**

Il semble alors nécessaire de développer une nouvelle méthode d'analyse permettant de mesurer l'influence de la morphologie de manière plus dynamique et plus synthétique, et surtout en tout point de l'espace. En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes, ce travail tente également de pallier les limites des indices classiques.

Chapitre 8

Un automate cellulaire (*RuiCells)* pour simuler l'influence de la morphologie sur les écoulements de surface : orientations méthodologiques

Introduction	**p. 220**
8.1. Point de vue théorique : jeux d'interactions et émergences	**p. 220**
8.2. Des automates cellulaires pour la simulation de processus spatiaux : règles de base et applications	**p. 223**
8.3. Structure et fonctionnement de l'automate *RuiCells*	**p. 228**
8.4. Développements méthodologiques	**p. 233**
Conclusions du chapitre 8	**p. 239**

Sorties de simulations numériques
Source : Logiciel RuiCells

Introduction

Profitant du développement des SIG, de l'augmentation des capacités des ordinateurs et de l'explosion du nombre de données numériques, certains auteurs ont récemment orienté leurs recherches sur les relations entre les paramètres morphométriques et la dynamique du ruissellement de surface (Douvinet *et al*., 2006b). Parmi les travaux les plus récents, on peut citer les modèles basés sur la *fonction de transfert* hydrologique et sur l'hydrogramme unitaire (Nasri *et al.,* 2004 ; Cudennec, 2008), les modèles conceptuels physiographiques distribués (Najani, 2003), les modèles physiques distribués (Plantier, 2003 ; Nunes *et al.,* 2005) ou les modèles basés sur les réseaux neuronaux artificiels (Moradkhani *et al*., 2005), venant s'ajouter à la liste des nombreux modèles spatialisés (Moussa, 2003 ; Lhomme *et al.,* 2004).

Sans remettre en cause les apports de ces méthodes, le but ici n'est pas de faire de la modélisation hydrologique : on souhaite isoler le rôle dynamique de la morphologie d'un bassin sur sa réponse hydrologique. L'approche doit également permettre d'évaluer cette influence en tout point de l'espace, et non plus se limiter aux résultats obtenus à l'exutoire.

Une méthode basée sur l'utilisation d'un automate cellulaire est très rapidement devenue pertinente. Dans le cadre d'études antérieures, l'automate *RuiCells (Ruissellement sur Cellules)* a été conçu pour simuler des phénomènes de ruissellement au sein de petits bassins versants, mais également pour mesurer le rôle de la structuration interne des bassins (Delahaye *et al*., 2001 ; Langlois et Delahaye, 2002 ; Langlois, 2007 ; base de modèles sur *Libergéo*).

C'est ce second volet qui a été développé ici, en gardant à l'esprit les objectifs suivants :

► proposer une **solution simple dans sa construction et facile à comprendre** ;

► intégrer les effets de forme, de réseaux et de pentes dans une **approche synthétique** ;

► **mesurer l'influence de ces différentes variables morphologiques** depuis les échelles locales, pour mieux aborder la construction spatiale de la réponse hydrologique globale ;

► **créer des indices pour quantifier la dynamique potentielle d'un bassin versant** ;

Après un rappel du contexte théorique dans lequel se place ce travail (§ 8.1.), les règles de base communes aux automates cellulaires sont présentées (§ 8.2.). La structure et le principe de fonctionnement de *RuiCells* (§ 8.3.), puis les développements apportés afin de répondre à notre problématique (§ 8.4.), sont ensuite commentés à travers différentes applications tests.

Ce chapitre doit permettre de justifier l'utilisation d'un tel **outil** pour évaluer l'influence dynamique de la morphologie sur les écoulements de surface, et fournir les éléments de base nécessaires à la bonne compréhension des simulations commentées dans le chapitre 9.

8.1. Point de vue théorique : jeux d'interactions et émergences

Les automates cellulaires se placent dans le **contexte théorique des systèmes complexes** (Langlois, 2007). *« Une hypothèse fondamentale relevant du cadre théorique des systèmes complexes est que le jeu des interactions entre les entités d'un niveau inférieur se traduit par l'émergence et le*

maintien de formes ayant du sens à un niveau supérieur » (Sanders, 2001). En faisant interagir les effets de formes (surface, réseau) et de pentes (volume) à travers les échelles, et en passant d'un niveau local (cellulaire) à un niveau agrégé plus global (exutoire final), on cherche à mieux **appréhender la construction spatiale de la réponse hydrologique.** En général, les études hydrologiques sont souvent menées à l'échelle globale du bassin versant (cf. chapitre 7). Dans ce travail, on se place à des échelles plus fines pour mettre en évidence les **structures spatiales** et les **interactions locales à partir desquelles émergent la dynamique globale**.

8.1.1. « *Structure organisationnelle* » et « *hiérarchie ensembliste* »

Les **relations** et la **dynamique du système** sont au cœur de cette étude ; les entités et les composantes individualisées sont alors mises au second plan. Le comportement du bassin ne se réduit pas à la simple superposition de ses composantes. Au lieu de considérer l'ensemble du système, on s'attache à **sa structure organisationnelle**, c'est-à-dire à la combinatoire entre ses parties qui, elles-mêmes, peuvent constituer des « *sous-systèmes* » (Engelen *et al.*, 1995 ; Sanders, 2001 ; Torrens, 2002). On s'intéresse finalement à ce que P. Langlois (2005a) appelle une « ***hiérarchie ensembliste*** ». En utilisant ce terme, on sous-entend l'existence de relations entre une structure hiérarchique « *verticale* » (« *emboîtée* ») et une hiérarchie « *horizontale* » qui existe entre les éléments de même niveau hiérarchique (fig. 8.1.).

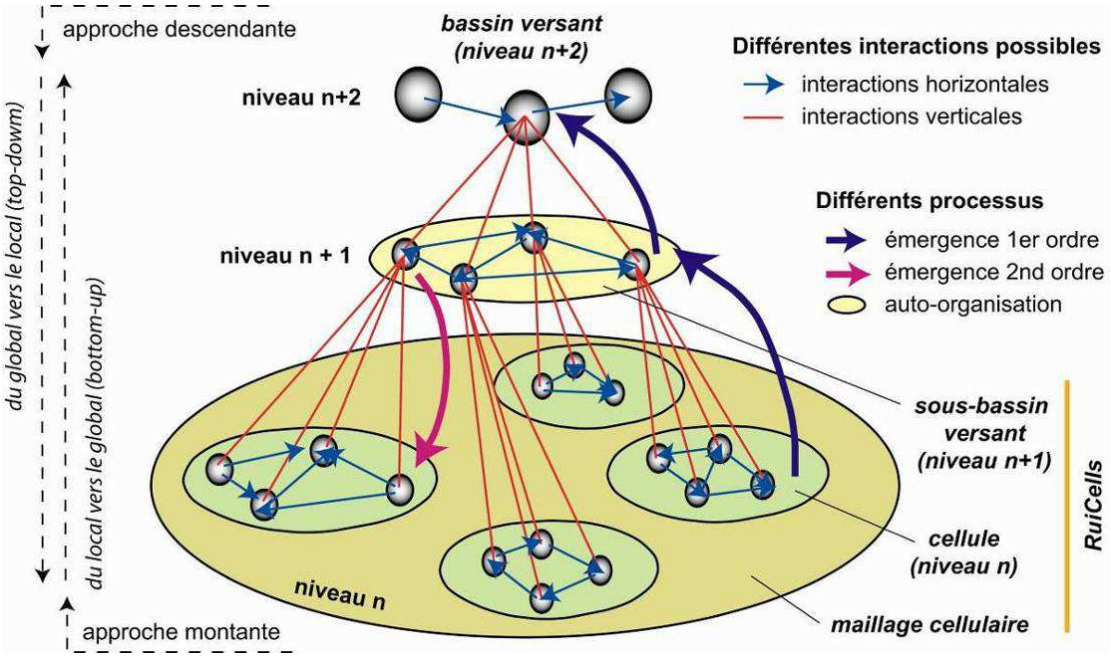


Fig. 8.1. Emboîtement des échelles « *verticales* » et « *horizontales* » au sens d'une pyramide de complexité (modifié d'après Heudin, 1998) et description des différents niveaux adaptés à cette étude. Les jeux d'interactions et les phénomènes d'émergence sont indissociables.

Si on applique ce principe au cas présent, la structure verticale relie les cellules (niveau n) à l'échelle globale d'un bassin (niveau n+2), avec, au niveau intermédiaire, les sous bassins versants (n+1). La structure horizontale, au niveau n par exemple, correspond aux cellules qui composent le maillage triangulaire. La **complexité** résulte alors de cette **association entre les niveaux verticaux et horizontaux qui existent entre les composantes.**

8.1.2. « *Emergences* » et « *auto-organisation* »

Ces deux notions sont couramment associées dans la littérature scientifique : **l'émergence** désigne le **phénomène**, au sens strict du terme, tandis que **l'auto-organisation** fait référence **aux processus et à la structure qui en sont à l'origine**. *« L'auto-organisation est le mécanisme responsable de l'émergence. C'est le processus par lequel l'effet collectif des interactions locales entre les entités du système, bien qu'apparemment désorganisé, forme une structure et un comportement ordonné émanant au niveau global »* (Parott, 2002).

La notion d'émergence apparaît pour la première fois dans *Le Hasard et la Nécessité* écrit par Jacques Monod (1970). **L'émergence** renvoie à quelque chose de nouveau, d'inattendu, qui apparaît comme imprévisible (Manson, 2001 ; Pumain, 2003 ; Fonstad, 2006). On désigne par ce terme d'émergence les **propriétés d'un système qui présente une nouveauté par rapport aux qualités des composants considérés isolément.** *« L'émergence met ainsi en scène le passage entre deux niveaux spatiaux qui s'adaptent en fonction du processus que l'observateur tente de décrire »* (Sanders, 2001). L'association de ces éléments induit l'apparition de phénomènes qui ne sont pas du tout prévisibles à des niveaux supérieurs : **il y a ainsi un saut qualitatif entre le local et le global** (Torrens et Benenson, 2005).

L'approche ascendante, qui va du local au global, est souvent privilégiée pour détecter ces processus d'émergences. Dans le cadre de cette étude, on tentera de faire émerger une réponse hydrologique à l'échelle **globale** à partir des interactions **locales**. On se place ainsi dans une approche essentiellement **ascendante**. L'approche descendante n'est cependant pas totalement exclue : *«Dans un aller-retour méthodologique de descente et de montée entre les niveaux, on peut prendre en compte à la fois le découpage simplificateur ou la reconstruction des interactions redonnant la cohésion globale »* (Langlois, 2007). M. Batty et P.M. Torrens (2001) rappellent que les processus macro trouvent leur origine dans les interactions locales, mais il est impossible de les comprendre si on se reste à ce niveau macro : *« Once understood, this behaviour is no longer surprising, but invariably it can only explained by processes that exist at a micro level giving rise to phenomena at a macro level which, in turn, cannot be explained in traditional macro terms ».*

Les deux approches sont fortement conseillées. En effet, le niveau global peut aussi réagir, en retour, sur le comportement et l'organisation des différents éléments. *« Chaque niveau est en même temps le produit de l'émergence à partir du niveau inférieur mais il est aussi un des éléments du niveau immédiatement supérieur »* (Dauphiné, 2003). Chaque niveau, en fonction de l'angle d'observation, peut tour à tour être local ou global. Afin de faciliter l'analyse, l'*émergence de premier ordre* désigne un comportement inattendu depuis le niveau inférieur (du niveau n vers le niveau n+1, du niveau n+1 vers le niveau n+2, etc.). En revanche, l'*émergence de second ordre* désigne un résultat surprenant depuis le niveau supérieur vers le niveau inférieur (dans une approche descendante). On appelle ce phénomène un processus d'*immergence* (fig. 8.12.).

Par opposition, l'auto-organisation désigne la structure à l'origine de cette émergence. *« L'auto-organisation considère l'évolution d'un système entre le niveau microscopique, constitué d'un grand nombre d'éléments en interaction, et le niveau macroscopique, où apparaissent des phénomènes collectifs non directement prévisibles »* (Pumain, 2003). Cette notion insiste sur le fait que des **processus identiques peuvent produire des structures et des effets différents** en fonction des conditions initiales. Les valeurs des paramètres contrôlent aussi les interactions internes et leurs évolutions. *« Au sens des physiciens, l'auto-organisation renvoie à la capacité que possède une population d'entités simples à se structurer dans l'espace et dans le temps, et à échanger de l'énergie avec l'environnement »* rappelle E. Daudé (2004).

Du fait des non linéarités et de l'imprévisible, la même structure à un niveau micro peut façonner différentes configurations au niveau macro : « *La dynamique de ces systèmes combine, en effet, des trajectoires stables et des moments d'instabilité, durant lesquels l'état macroscopique du système peut évoluer vers différentes formes d'organisation, de manière imprévisible, selon des bifurcations* » (Pumain, 2003). Les **phénomènes auto-organisés** ont la particularité de ne pas être pilotés ou contrôlés par des éléments qui agissent à des niveaux supérieurs, mais sont le résultat des seules interactions entre les entités élémentaires du système (Daudé, 2004).

Dans les textes actuels, on parle plus d'émergence que d'auto-organisation : l'accent est porté sur la « *surprise* » de l'observateur et l'imprévisibilité du résultat. «*Dans le monde réel, de la nouveauté est produite, elle émerge véritablement à partir de ce qui existe ; dans la transcription que nous en faisons dans les ordinateurs, les phénomènes d'émergence que nous savons simuler pour le moment, qui produisent un effet de surprise pour l'observateur, sont le plus souvent liés à la difficulté de celui-ci à concevoir le résultat du jeu des règles qu'il a lui-même implémentées* » (Pumain, 2003).

8.1.3. Le « *bassin versant* » perçu comme « *un système spatial complexe* »

Le « *bassin versant* », tel qu'il est considéré ici, est finalement perçu comme un « ***système spatial complexe*** » (Delahaye, 2002, 2005). La connaissance des composantes internes est très insuffisante pour comprendre la dynamique hydrologique mesurée à l'échelle globale. **Il faut mettre en interaction les différentes variables, et surtout ne pas se limiter à une approche « *cloisonnée* » *et* « *séparée* » de ces composantes.** Ce constat rappelle les limites d'utilisation des indices morphométriques qui ont été présentées auparavant (cf. chapitre 7).

Le bassin versant présente toutes les caractéristiques d'un « *système complexe* » :
- un **grand nombre** de composantes (objets) ;
- des éléments regroupés en sous-ensembles organisés en **niveaux hiérarchisés** ;
- des éléments reliés par des **interactions nombreuses** et de multiples types ;
- un comportement non linéaire mais produit par un système relativement simple ;
- une interdépendance des phénomènes en relation avec leur irréversibilité.

Pour J-L. Le Moigne (1999), « *la complexité se définit comme la caractéristique d'une situation dans laquelle l'observateur sait a priori qu'il ne connaît pas de façon précise ni la liste de tous les états possibles que le phénomène est susceptible de manifester (fut-ce de façon fugace), ni celle de tous les programmes qui permettent d'atteindre tel ou tel de ces états.* » **Autrement dit, le système est susceptible de manifester un comportement imprévisible à prévoir pour cet observateur.**

C'est en gardant à l'esprit toutes ces notions liées à la complexité que l'on peut désormais présenter la structure des automates cellulaires, puis l'automate *RuiCells.*

8.2. Des automates cellulaires pour la simulation de processus spatiaux : règles de base et applications

La naissance des **automates cellulaires** (AC) est le résultat d'une collaboration entre deux chercheurs (Ulam et Von Neumann) qui travaillaient, dans les années 1940, au *Los Alamos National Laboratory* (Phipps et Langlois, 1997 ; Langlois, 2005b). Ulam étudiait la croissance

des cristaux en la modélisant sur une grille, tandis que Von Neumann, dans le même temps, travaillait sur des systèmes auto-réplicatifs et rencontrait des difficultés pour expliciter son modèle initial d'un robot qui se copierait tout seul à partir de pièces détachées. Cherchant à créer une machine qui aurait la capacité de résoudre l'autoreproduction, Ulam lui conseilla de s'inspirer de ses travaux, et notamment d'utiliser une construction formelle qui se baserait sur un système cellulaire : de cette collaboration naîtra le **premier automate cellulaire**, basé sur une grille à deux dimensions où chaque cellule pouvait prendre 29 états.

8.2.1. Arrivée des premiers automates en géographie

A la fin des années 1950, les automates cellulaires ont été utilisés par des chercheurs qui s'intéressent à la théorie de l'information (Holland) et à celle des mathématiques (Fredkin). A l'époque, les ACs utilisent un nombre restreint d'états, souvent moins de 20, et des fonctions de transition simples (Von Frisch, 1971 ; Tobler, 1979). Si la popularité des ACs se répand progressivement, il faut néanmoins attendre les années 1970 et les travaux de John Conway (Gardner, 1970), avec le Jeu de la Vie (*The Life of Game),* pour qu'un AC très simple devienne médiatisé. Cet AC reste à ce jour le plus simple puisqu'il n'a que deux états (vie ou mort) et qu'il vérifie plusieurs propriétés mathématiques (Langlois, 2005a). Ce premier AC est surtout fondamental car on se rend compte que **des propriétés simples peuvent générer des formes complexes, ouvrant alors la voie à de nombreuses investigations.**

Les applications se développent au début des années 1980. S. Wolfram (1983) découvre, par exemple, que certains automates, pourtant construits à partir de règles élémentaires, ont la propriété de faire émerger des structures dites « *complexes* ». Bon nombre de disciplines vont dès lors concevoir, formaliser puis expérimenter les ACs dans leur propre domaine.

La géographie n'échappe pas à la « *vague de popularité* » de cette nouvelle méthode de modélisation. **Les applications sont pionnières en géographie sociale puis en géographie urbaine** (O'Sullivan, 2001 ; Engelen *et al*, 1995 ; Torrens et Benenson, 2005). W. Tobler (1979) est le premier à formaliser l'idée d'une *géographie cellulaire* [1]. Il montre comment des concepts géographiques apparaissent à partir de règles simples, en prenant l'exemple de l'expansion du territoire dans la région de Détroit (Pumain, 2003). H. Couclelis (1985) remarque que des processus globaux peuvent émerger à partir d'interactions géographiques locales simplistes. M. Phipps (1989), en étudiant la formation théorique de parcelles générées par des processus écologiques et anthropiques, et notamment l'expansion urbaine, ouvre la voie à de nouvelles applications en géographie urbaine dans les années 1990 (Langlois, 1994 ; Batty *et al*., 1997 ; Engelen, 2001 ; Pumain, 2003 ; Dubois-Paillard *et al*., 2004 ; Antoni, 2006). Les applications partent dès lors dans de multiples directions, et **elles vont même progressivement arriver en géographie physique et environnementale** (Fonstad, 2006).

Aussi prometteuse soit-elle, l'utilisation des automates cellulaires en géomorphologie et en hydrologie est relativement novatrice. De nombreux articles témoignent d'un intérêt récent et croissant depuis le début des années 2000 (Coulthard *et al*., 2000, 2005 ; Crave et Davy, 2001 ; Crisci *et al*., 2003 ; Jimenez-Hornero *et al*., 2004 ; Iovine *et al*., 2005 ; Avolio *et al*., 2006 ; Dmitriev *et al*., 2006 ; Faraco *et al*., 2006 ; Fonstad, 2006 ; Ménard et Marceau, 2006 ; Sarkar et Abbasi, 2006 ; Shoshani et Kelman, 2006 ; Hernandez-Encinas *et al*., 2007 ; Lajoie et

[1] L'intérêt des géographes pour les automates cellulaires commence sans doute avec les travaux d'Hägestrand (1968) qui propose un modèle de diffusion des innovations fondé sur des mécanismes de contact entre individus. Il simule la diffusion d'un processus d'innovation, à savoir les effets de la subvention agricole, entre 1929 et 1932, sur la transformation des surfaces boisées en pâtures en Suède à partir d'un maillage cellulaire (Daudé, 1994, 2003).

Hagen-Zacker, 2007 ; ; Nicholas, 2005 ; Thomas and Nicholas, 2002 ; Van de Wiel *et al* , 2007). De manière très générale, l'utilisation des automates cellulaires (Annexe 8.1.) a récemment ouvert de nouveaux champs d'investigation (Douvinet *et al*., 2007b).

8.2.2. Un langage de base commun à tous les ACs

Des efforts de formalisation depuis les travaux de Burks, Ulam, Von Neumann et Moore, dans les années 1940, puis la popularité de certains automates comme le Jeu de la vie (*Game of life*) de John Conway (1970) et le modèle de Schelling, par exemple, ont permis la naissance d'un langage commun aux Automates Cellulaires (AC), malgré la profusion des structures et des règles de voisinage. L. Sanders (2001) rappelle que *« malgré la diversité des phénomènes étudiés, la variété des outils, ou la multitude des interactions spatiales, ces outils s'inscrivent dans un cadre interdisciplinaire très large, avant tout d'ordre méthodologique, qu'il convient de bien rappeler »*. **Si les automates cellulaires sont adaptés à chaque objet, leur base repose sur des principes fondamentaux que nous devons, au préalable, forcément rappeler.**

Un automate cellulaire est un modèle qui simplifie une réalité à un groupe d'automates (entités pouvant traiter de l'information et exécuter des actions) d'aspect cellulaire (Hogeweg, 1988 ; Phipps et Langlois, 1997). Ce sont des automates simplifiés à états finis, identiques, interconnectés entre eux, et disposés régulièrement dans un espace. De manière formelle, un **ensemble d'états** (E) et des **règles de transition** (T) forment un **automate** (A) :

$$\mathbf{A} \sim (\mathbf{E}, \mathbf{T})$$

En général, les automates cellulaires classiques se composent de cinq éléments (Weisbuch, 1989 ; Wolfram, 2002 ; Fonstad, 2006 ; Ménard et Marceau, 2006 ; Langlois, 2007) :

❶ **L'espace est représenté par une matrice qui équivaut à un arrangement de cellules** (automates) qui peuvent être linéaires (unidimensionnelles), surfaciques (bidimensionnelles) ou volumétriques (tridimensionnelles). Les cellules sont organisées au sein d'un réseau, dont elles occupent les nœuds (fig. 8.2.), qui est organisé de manière régulière ou non (Phipps et Langlois, 1997). Dans sa forme la plus classique, la matrice est considérée comme étant à la fois infinie, uniforme et constituée de cellules carrées.

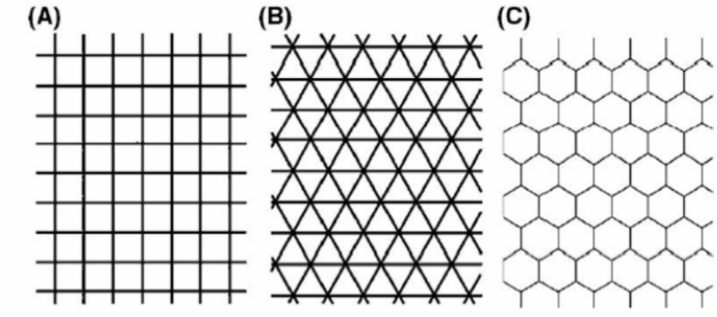


Fig. 8.2. Différentes mailles carrées (A), triangulaires (B), hexagonales (C) (d'après Fonstad, 2006).

❷ **Chaque cellule contient une valeur d'attribut extraite d'un ensemble discret d'états possibles** qui ont le même poids et qui sont normalement peu nombreux. La valeur d'un état peut être logique (binaire), quantitative (entier) ou symbolique (alphabet, des couleurs…).

❸ Le **fonctionnement** d'un automate cellulaire est **itératif** : les états des cellules évoluent dans une dimension temporelle discrète, soit par **itération**. On distingue le mode synchrone, où les cellules s'exécutent toutes en même temps, et le mode asynchrone, où les cellules s'exécutent les unes après les autres, dans un ordre qui peut changer à chaque pas de temps et qui est spécifié par l'utilisateur. Le fonctionnement des cellules est lié à un pas de temps commun à toutes les cellules. Ces itérations sont donc ponctuées par les règles de transition (T). On représente ce pas de temps par une variable entière ***t*,** qui vaut 0 au démarrage de la simulation, et qui augmente de 1 à chaque étape.

❹ Le mécanisme de transition entre deux états est défini par les **règles de transition (T).** Ces règles sont statiques et elles ne peuvent pas être modifiées au cours de la simulation. Ce mécanisme interne de l'automate se décompose en deux fonctions : la première reconnaît l'état de chaque cellule ($\mathbf{E}_t$) et le modifie en fonction d'un intrant (**I**) et de l'état précédent de la cellule ($\mathbf{E}_{t-1}$); la seconde renvoie à l'extérieur de la cellule son nouvel état (**S**) susceptible de modifier l'état des autres cellules. L'état des cellules est donc mis à jour à chaque itération :

$$\mathbf{T} : (\mathbf{E}_t, \mathbf{I}_t) \rightarrow \mathbf{E}_{t+1}$$

❺ Les règles de transition opèrent suivant les règles de voisinage qui spécifient comment les différents états des cellules réagiront aux états se trouvant dans le voisinage immédiat (R) de chaque cellule. Ces règles peuvent être déterministes, probabilistes ou de type « *chaîne de Markov* » (Langlois, 2005). Les liens de voisinage correspondent aux liens du réseau, qui sont les connexions d'entrée-sortie entre les cellules : ils permettent à la cellule de connaître l'état de ses « *voisines* ». Dans sa forme classique, le voisinage est local, défini pour ne comprendre que les voisins contigus de premier ordre (voisinage de Von Neumann ou de Moore).

$$\mathbf{A} \sim (\mathbf{E}, \mathbf{T}, \mathbf{R})$$

Chaque voisin possède un poids identique dans l'application des règles de transition (fig. 8.3.). Les voisinages de premier ordre les plus utilisés sont des maillages triangulaires (voisinage de 3 cellules), carrés (voisinage de 4 cellules, également nommé voisinage de Von Neumann), hexagonaux (6 cellules) ou orthogonaux (8 cellules, ou voisinage de Moore).

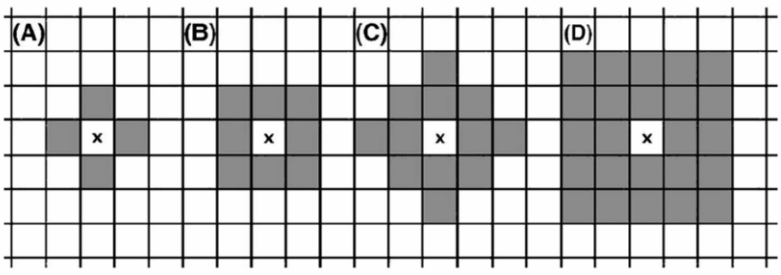


Fig. 8.3. Règles de voisinage dans une matrice carrée : A / Moore ; B / Von Neumann ; C/ Moore de rayon 2 (ou d'ordre 2) ; D / Von Neumann de rayon 2 (d'après Fonstad, 2006).

L'automate cellulaire possède donc une structure qui définit ses caractéristiques : taille et forme de la matrice ; géométrie du réseau ; topologie et raccordement des bords ; domaine fini ou non, illimité ou non… De plus, les cellules sont localisées et dessinées dans un espace géométrique, la réunion de l'ensemble des formes des cellules constituant le **domaine spatial** d'application de l'automate. Même si ces éléments sont simples et récurrents dans la plupart des ACs, la combinatoire des configurations est gigantesque (Ollinger, 2002 ; Wolfram, 2002).

8.2.3. Les ACs et la géographie : avantages et modifications apportées

Pour les géographes intéressés à simuler la dynamique de processus spatiaux complexes, les automates peuvent présenter **de nombreux avantages** (Ménard et Marceau, 2006) :

- ce sont des modèles qui **traitent l'espace de manière explicite** et à un niveau de détail considérable. L'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs a facilité l'apparition de nouvelles méthodes en s'affranchissant de la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles (Sanders, 2001) ;

- les automates cellulaires s'attaquent à des systèmes de plus en plus « *complexes* », avec une discrétisation assez fine de l'espace et du temps. Cette propriété les rend compatibles avec la majorité des bases de données spatialisées comme les SIG (White *et al.*, 1997) ;

- ils sont **faciles** à comprendre **et simples** à implémenter, comparativement aux modèles analytiques traditionnels (Ménard *et al.* 2004). « *Ils sont hautement adaptables et sont souvent utilisés pour décrire un nombre de situations ou des processus spatiaux variés* » (Langlois, 2005);

- il est aisé de faire le lien entre les **processus**, encapsulés dans les règles de décision, et les **patrons** (forme, structure) qu'ils génèrent, même **à partir de règles simples** ;

- par leur utilisation, **on peut tester des hypothèses, ce qui permet de réaliser des tests, résultats graphiques à l'appui, sans nécessairement passer par des expérimentations. «** *Les simulations amènent les utilisateurs à se poser la question "Que se passe-t-il si ?" ; elles permettent l'observation et la prédiction des processus dynamiques ; elles peuvent autrement être utilisées pour détecter des comportements imprévisibles à différentes échelles, à la fois spatiales et temporelles, produisant ainsi des résultats inattendus ou surprenants*» (Fonstad, 2006).

Malgré leurs attraits évidents, la structure authentique des automates cellulaires n'est pas toujours adaptée à la simulation de phénomènes en géographie. **Plusieurs modifications** ont ainsi été apportées par rapport au formalisme traditionnel défini par Wolfram (1983, 1994) :

- **la structure régulière et infinie de l'espace peut être remplacée par une matrice de dimension finie,** et quelquefois composée de cellules de tailles et de formes variables ;

- le **voisinage** est fréquemment **élargi** pour englober jusqu'à plus d'une centaine de cellules et les états des cellules de ces voisinages sont pondérés par la distance à la cellule pour respecter les principes d'*auto-corrélation spatiale* (Sanders, 2000 ; Pumain, 2003) ;

- les **règles de transition** ne sont plus déterministes mais **probabilistes**, ce qui permet de tenir compte de la variabilité inhérente aux systèmes écologiques et / ou anthropiques (Coulthard *et al.*, 2005, 2007). Ces règles deviennent alors **sélectives**, c'est-à-dire qu'elles ne s'appliquent pas de façon identique à toutes les cellules.

Les modifications apportées aux automates classiques ont fait surgir un **débat** au sein de la communauté scientifique. A. Ménard et D.J. Marceau (2006) pensent que ce sont toujours des ACs, les différenciant par le terme d'Automates Cellulaires Géographiques (ACGs), car ils gardent la propriété de générer des structures « *complexes* ». Ils ont des objectifs communs aux outils classiques : comprendre la dynamique et simuler l'évolution d'un système à partir d'hypothèses simples exprimées dans les règles de transition.

Après cette présentation des principes de bases, règles de fonctionnement et applications possibles, il est désormais possible de présenter l'automate cellulaire *RuiCells*. C'est en effet à travers cet automate, qui découpe finement **l'espace** en **cellules homogènes et connectées entre elles**, que va être envisagée l'analyse de la structuration des bassins.

8.3. Structure et fonctionnement de l'automate *RuiCells*

L'automate *RuiCells (Ruissellement sur Cellules*) a, au départ, été créé puis développé pour permettre la simulation du ruissellement érosif au sein de petits bassins ruraux (Delahaye *et al*., 2001 ; Langlois et Delahaye, 2002). Patrice Langlois est le modélisateur et le développeur de cet automate codé sous langage Pascal (système de développement Delphi).

La structure de l'automate permet d'associer un **maillage triangulaire régulier** (bien plus précis pour la simulation des écoulements de surface) à une **base de données spatiale** (SIG). Si cet automate a été fortement modifié par rapport à la définition classique des ACs, il n'en garde pas moins certaines règles de base par raport au formalisme traditionnel. On peut ainsi le classer dans la catégorie des **Automates Cellulaires Géographiques** (Ménard *et al*., 2004).

8.3.1. Construction et particularités du maillage

Le concept classique d'Automate Cellulaire a dû être généralisé pour pouvoir modéliser à la fois la structure variable des éléments de terrain et la connectique entre les cellules. **Les liens d'écoulement ne sont plus guidés uniformément par la topologie de voisinage du réseau cellulaire, mais par les liens structurant la surface.** La démarche s'appuie sur un **automate cellulaire généralisé,** dont les cellules sont de formes et de dimensions variables (point, ligne, surface), et dont les liens traduisent directement la structure morphologique de la surface (Langlois et Delahaye, 2002 ; Jaziri, 2004).

La difficulté était de relier les **variables topographiques** (l'altitude et ses dérivées) et les **variables hydrauliques** (direction et sens des écoulements). De nombreux travaux ont déjà été confrontés à ce problème (Tarboton *et al*., 1991 ; Palacios-Velez, 1998 ; Tucker *et al*., 2001) :

- la **méthode des éléments finis** (Cavendish, 1974) peut être utilisée pour simuler un phénomène dynamique sur chaque élément du maillage en faisant appel à un ensemble d'équations aux dérivées partielles, et à des conditions aux limites du domaine et de raccordement entre les éléments (Langlois, 2005b ; Langlois, 2007) ;

- la **méthode des différences finies,** représentant la surface par des « *escaliers* », définit la pente par la différence entre éléments voisins (Laurent *et al.,* 1998) ;

- une triangulation peut être utilisée pour définir le sens et la direction des écoulements de chaque cellule vis-à-vis des autres cellules voisines (Tarboton, 1997 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). Le plus souvent, une **triangulation irrégulière**, que l'on appelle TIN (*Triangular Irregular Network*) est privilégiée dans les modèles hydrologiques distribués (Mita *et al*., 2001). O.C. Palacios-Vélez *et al*. (1998) proposent de simuler l'écoulement de surface en se basant sur deux « *cascades dynamiques* », l'une portant sur les triangles (pour l'écoulement surfacique), et l'autre sur les arcs (pour l'écoulement linéaire).

Le modèle *RuiCells* développé par P. Langlois reprend un certain nombre d'idées tout en introduisant des améliorations pour s'adapter à la thématique proposée. Un maillage suivant la **méthode des éléments finis** a été gardé : il permet de définir une surface d'interpolation continue à partir des altitudes connues à chaque nœud du maillage. *« On peut représenter en tout point P du domaine, son altitude z, son vecteur normal à la surface, par une fonction continue, linéaire par morceaux, permettant de calculer toute grandeur liée à la forme locale du terrain (pente, exposition, vecteur d'écoulement, puis surfaces, volumes, débits, etc. »* (Langlois et Delahaye, 2002).

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) (ici, au pas de 50m de côté) sont utilisés pour la construction du maillage. Des mailles carrées sont souvent construites à partir de ce type de données (Mita *et al*., 2001 ; Jetten *et al*., 1996). Néanmoins, l'écoulement entre deux cellules carrées présente l'inconvénient de ne pas coïncider finement avec la réalité du terrain, et les calculs sont alors plus complexes, ce qui a pour effet d'accroître les temps de calcul lorsqu'ils portent sur un grand nombre d'éléments (Langlois, 2007).

Chaque carré a alors été découpé en deux triangles en choisissant une des diagonales. La diagonale dont le milieu est le plus bas a systématiquement été choisie afin de favoriser la direction des écoulements (fig 8.4.). Cette procédure a été validée par D.G. Tarboton (1997). Dans la majorité des cas, le maillage triangulaire permet une meilleure simulation des flux. Cela permet d'avoir un modèle unique simplifiant la programmation et s'adaptant à toutes les données. D'autre part, les éléments triangulaires offrent, par leur linéarité intrinsèque, le modèle d'élément fini le plus simple, ce qui est utile lorsque le modèle fait fonctionner un grand nombre de mailles (Langlois et Delahaye, 2002).

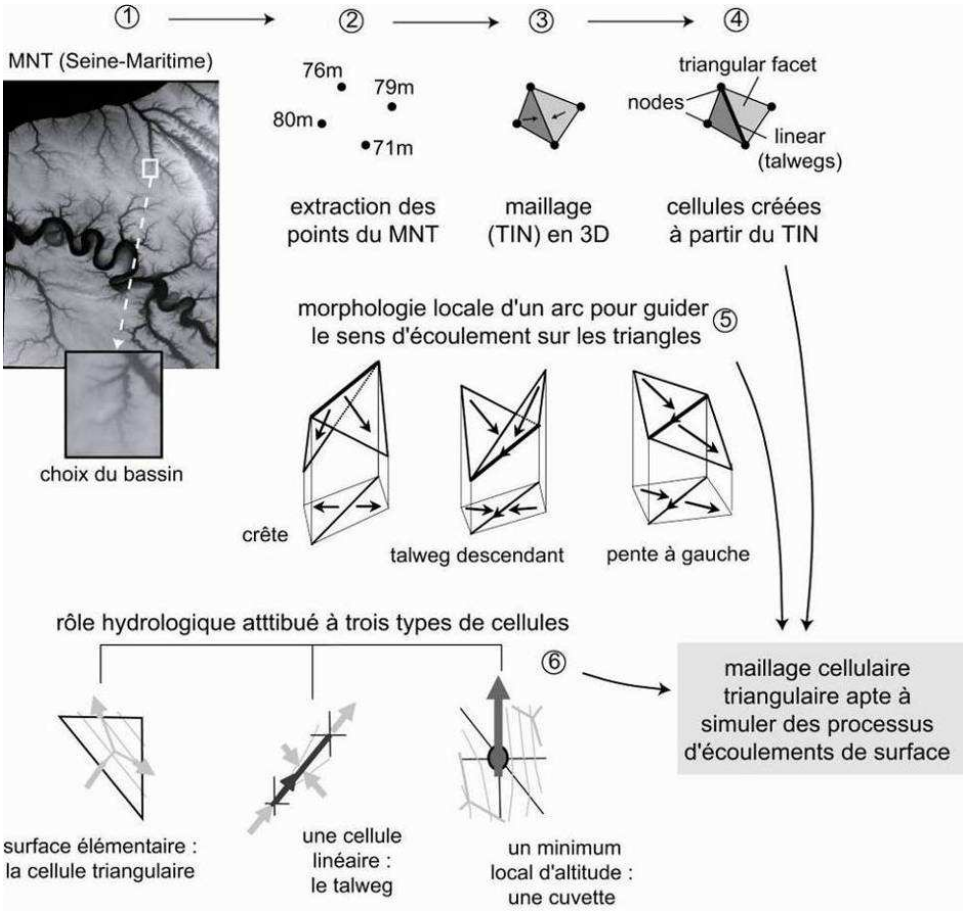


Fig. 8.4. Construction du maillage à partir d'un Modèle Numérique de Terrain.

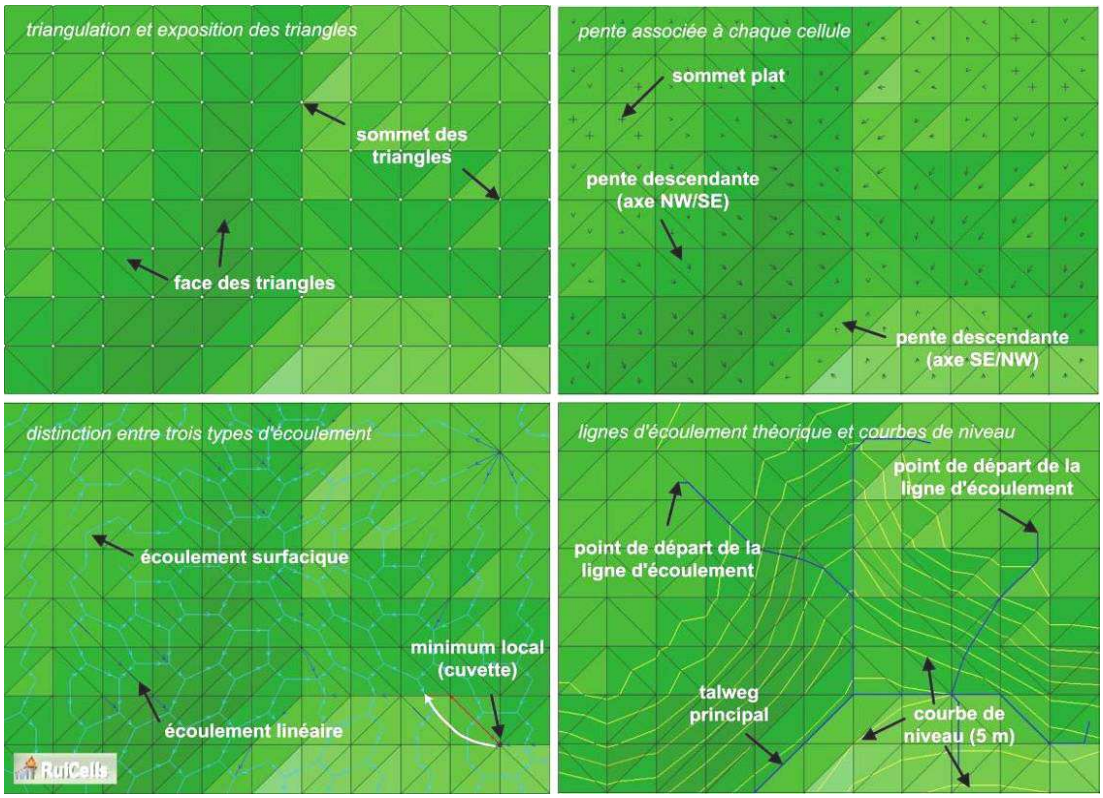


Fig. 8.5. Découpage du MNT en cellules triangulaires régulières, pentes associées et types d'écoulement intégrés à travers le graphe d'écoulement.

La construction des liens d'écoulement entre les cellules repose sur le rôle structurant des éléments du graphe topologique. Les arcs jouent un rôle central car ils portent la structure morphologique locale de l'ensemble de la surface (fig. 8.4.). Chaque arc est connecté à deux pôles et deux triangles, dont les altitudes des deux premiers et les pentes relatives des deux derniers permettent de donner à l'arc un attribut morphologique. En comparant les altitudes des deux pôles, on distingue les arcs descendants, montants ou plats (fig. 8.5.). Un arc qui a son pôle final plus bas que son pôle initial sera descendant. Si deux triangles adjacents sont en pente descendante vers lui, ce sera un talweg descendant. On arrive ainsi à une typologie théorique en $3^3 = 27$ cas possibles (Delahaye *et al*., 2001).

Trois types d'écoulements sont finalement **distingués** : surfaciques (écoulements sur les cellules), linéaires (sur les talwegs) et ponctuels (dans les cuvettes ; fig. 8.4.). Cette distinction est plus précise que celle proposée par O.C. Palacios-Velez *et al.* (1998). Les algorithmes d'écoulement sont valables quelles que soient les anomalies de pente du terrain (cuvettes, zones planes). Les écoulements sont ensuite intégrés dans un graphe d'écoulement (fig. 8.5.).

« La modélisation de la surface en facettes planes, si elle est simple à modéliser lorsqu'elle ne présente pas d'anomalies de pentes, nécessite une machinerie plus complexe si l'on désire la faire fonctionner dans tous les cas de figure, sans avoir à remanier les anomalies de pente du MNT. Cela nécessite alors de prendre en compte des écoulements, non seulement surfaciques et linéaires, mais aussi de prendre en compte les points d'accumulation (minima locaux ou cuvettes), les zones de discontinuité de l'écoulement (parties planes) et les boucles (cuvettes à déversoirs réciproques). Nous construisons alors l'automate avec un ensemble de cellules surfaciques, linéaires et ponctuelles, dont la structure et la forme sont déduites du maillage, et dont le fonctionnement est adapté aux différents types d'écoulement » précisent Langlois et Delahaye (2002).

Tous les liens d'écoulement entre les différents éléments du graphe topologique (pôles, arcs, triangles) sont désormais pris en compte. Le graphe d'écoulement ressemble à un **dual orienté** du graphe topologique mais il est plus complexe car *« le graphe dual ne relie entre elles que les faces alors que celui-ci relie les pôles, les arcs et les faces entre eux »* (Delahaye, 2002). **On peut ainsi passer d'un écoulement surfacique à un écoulement linéaire (sur un arc) ou se trouver bloqué dans un pôle si ce dernier est une cuvette (fig. 8.4.).**

Un triangle est toujours relié par l'amont à deux triangles ou plus, adjacents par les côtés, mais il peut aussi être relié à plusieurs sommets, ou être relié vers l'aval à des triangles ou à des côtés adjacents. Lorsqu'un l'écoulement se déverse dans deux triangles, un *coefficient de transition* est défini pour calculer la proportion qui va s'écouler dans chacun des triangles. Pour illustrer ce propos, un exemple montre comment l'écoulement venant d'un talweg amont se répartit sur les faces des trois triangles situés en aval (fig. 8.6.), proportionnellement aux angles des plus grandes pentes, ce qui donne ici une dispersion équivalente (33%).

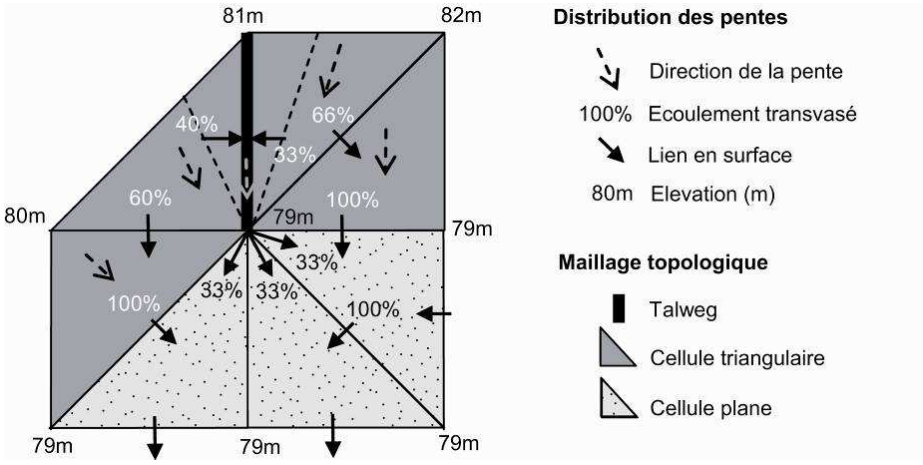


Fig. 8.6. Coefficient de transition pour la répartition des écoulements vers l'aval.

La dispersion se fait en fonction de l'angle de la plus grande pente associée aux triangles. Ce module de calcul se retrouve chez D.G. Tarboton *et al*. (1991) et dans le *LDDN* (*Local Drainage Direction Network*) défini dans le modèle Pc Raster (Bates et De Roo, 2000).

D'autres réglages ont été nécessaires pour rétablir le lien entre les cuvettes et le graphe d'écoulement, pour prendre en compte la répartition des écoulements dans les zones planes ou pour pallier les problèmes liés à la résolution du Modèle Numérique de Terrain (MNT). P. Langlois et D. Delahaye (2002) apportent davantage de précisions dans leur article.

8.3.2. Principes de fonctionnement

Après une première phase d'initialisation (à l'instant *t = 0)*, **le fonctionnement est itératif**. Chaque changement d'état de la cellule entre deux itérations (*tn)* est divisé en deux phases :

- une phase de communication entre les cellules : étape qui consiste à affecter les registres d'entrée dans chaque cellule à partir de l'état précédent des cellules amont ;
- une phase d'évaluation du nouvel état de chaque cellule : étape qui fait le bilan entre les données d'entrée et l'état de la cellule à l'état précédent (fig. 8.7.).

Les données des entrées et des sorties sont comptabilisées pour chaque cellule en même temps, soit **en mode synchrone**. Ainsi, à chaque itération (*tn* + 1), les cellules se vidangent dans les cellules qui sont connectées en aval, et elles reçoivent les surfaces venant de celles situées en amont (Langlois et Delahaye, 2002 ; Delahaye, 2005).

Le fonctionnement itératif, discret, et synchrone de *RuiCells*, a été validé à travers une application test (Langlois et Delahaye, 2002) dont les grandes lignes sont reprises ici pour bien montrer le principe de diffusion de l'information sur le maillage. Cet exemple a été testé sur une maille de 5 cellules (fig. 8.7.) pour calculer la surface amont de chaque cellule tout en faisant transiter « *l'écoulement de surface* » comme les données d'entrée. La valeur du haut (**V**) correspond aux **entrées** dans chaque cellule et à chaque itération ; la valeur (**S**) totalise la somme des surfaces passées dans chaque cellule à la fin de chaque itération. Les valeurs qui se trouvent en dehors des cellules indiquent les valeurs de surface en train de transiter entre deux itérations (entre *tn* et *tn* + 1).

A l'instant *t0*, les valeurs des cellules sont à l'état initial, schématisées à 1 pour faire très simple. Au cours de la première itération, les valeurs se vidangent dans les cellules situées en aval et les valeurs qui transitent se situent sur les flèches. A la fin de la première itération, toutes les cellules amont se sont vidangées, les valeurs (**V**) sont donc nulles. Les écoulements de surface continuent ensuite à transiter jusqu'à l'exutoire (la 5ème cellule la plus en aval) et il faut attendre la troisième itération pour qu'il n'y ait plus aucune valeur en train de circuler entre les cellules. Les cases (**S**) gardent en mémoire toute sorte d'informations. Dans le cas présent, c'est le cumul des surfaces ayant transité dans chaque cellule (fig. 8.7.).

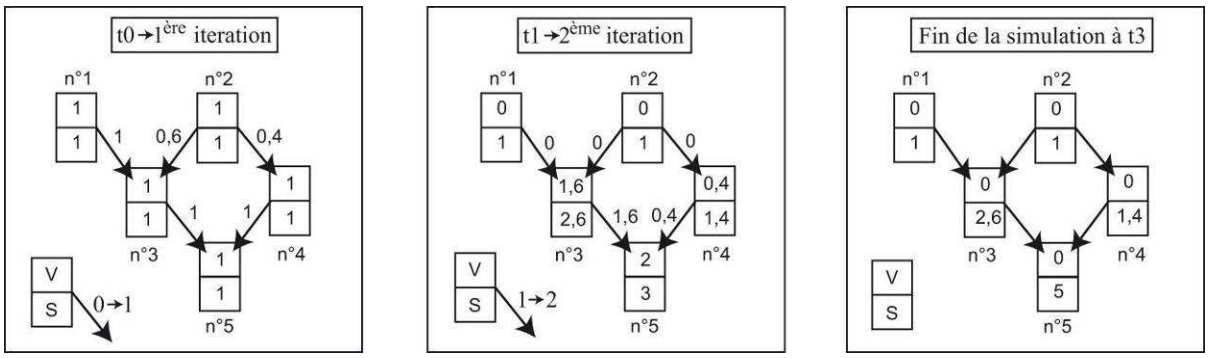


Fig. 8.7. Cheminement de l'écoulement de surface sur 5 cellules (Douvinet *et al.*, 2006).

8.3.3. Dynamique du système

L'automate *RuiCells* offre la possibilité de faire transiter de cellule en cellule, via les axes d'écoulement qui s'auto-organisent en fonction de la morphologie du terrain, n'importe quel type de données quantitatives : surface, pluie, débits, coefficients de ruissellement (Delahaye, 2005). Dans ce travail, la **surface**, qui est la **première information contenue par une cellule**, sera principalement utilisée. Ainsi, selon le même principe que pour un écoulement d'eau, l'automate provoque l'écoulement des surfaces de cellule en cellule en fonction des axes de circulation définies par le graphe d'écoulement. Toutes les cellules se vidangent dans celles qui sont connectées en aval et elles reçoivent les surfaces venant de celles situées en amont à chaque itération. Le processus itératif s'achève lorsque l'ensemble des surfaces a transité par le point de mesure, c'est-à-dire quand l'ensemble du bassin est vidangé de sa surface.

Deux types de paramétrages sont possibles (Delahaye, 2002 ; Delahaye *et al*., 2007a) :

- soit le rythme de circulation des surfaces est **guidé par l'automate**. La **vitesse**, régulée par le **processus itératif**, est **constante** et la pente des cellules n'est pas prise en compte dans la circulation des surfaces. Dans ce cas-là, seule l'incidence de la forme d'un bassin dans un espace plan à deux dimensions est mesurée ;

- soit la circulation des surfaces est **influencée par l'angle de la pente** associée à chacune des cellules. L'effet de la pente est introduit dans la simulation par le biais d'une formule affectée aux cellules qui module le transit des surfaces. Le module de vitesse dépend de plusieurs paramètres que l'utilisateur peut modifier avant chaque simulation. P. Langlois explique, de manière beaucoup plus détaillée, les différents paramètres utilisés (Langlois, 2007, cf. Annexe 8.2.). Le résultat traduit, cette fois-ci, les effets combinés de la forme et du système de pentes dans un espace à trois dimensions.

Cette double approche est essentielle car les effets de la forme, des réseaux et du système de pentes sont progressivement combinés. **On peut ainsi mieux évaluer la part de chacune des variables morphologiques, puis passer d'un espace à deux puis à trois dimensions.**

8.4. Développements méthodologiques

8.4.1. Cartographies des écoulements en tout point de l'espace

Un des objectifs initiaux est rapidement atteint : à la fin de chaque simulation, l'automate permet d'établir une **cartographie des écoulements de surface en tout point de l'espace.** La manière dont la réponse hydrologique se construit spatialement au sein du bassin, depuis les zones sources jusqu'à l'exutoire, est **beaucoup plus facile à analyser.**

Pour illustrer ce propos, une simulation des écoulements dans un espace 2D est présentée sur deux bassins de taille relativement similaire (fig. 8.8.). En passant du vert au jaune, au orange, puis au rouge, la carte indique la part que représente le cumul des surfaces passées dans chaque cellule par rapport à la surface totale du bassin. Ces cartes composées de classes colorées montrent la **structuration** des écoulements et leur **hiérarchisation** au sein de bassins qui sont de même taille, mais qui présentent des formes totalement différentes (fig. 8.8a.).

Un graphique des surfaces passées à l'exutoire final, défini par l'utilisateur, est également réalisé à la fin de la simulation (fig. 8.8b.). Par commodité, la courbe élaborée uniquement à partir des distances à l'exutoire, dans un espace à deux dimensions, est désignée par le terme « *surfaçogramme* » ; celle qui intègre la vitesse d'écoulement, dans un espace 3D, sera appelée « *morphogramme* » (Delahaye, 2002).

Ces graphiques indiquent une fonction de distribution des surfaces à chaque itération. On peut alors faire un rapprochement avec la « *fonction aire-distance* » décrite de manière plus détaillée dans le chapitre 7. **On améliore considérablement cette fonction car on considère la surface d'un bassin et sa connexion avec les talwegs, et non plus seulement le nombre de pixels ou de drains situés à équidistance de l'exutoire** (Beven, 2003). Le fait d'utiliser un maillage triangulaire et de faire la distinction entre trois types d'écoulement, permet surtout d'affiner cette fonction en se rapprochant un peu plus de la réelle topographie du terrain.

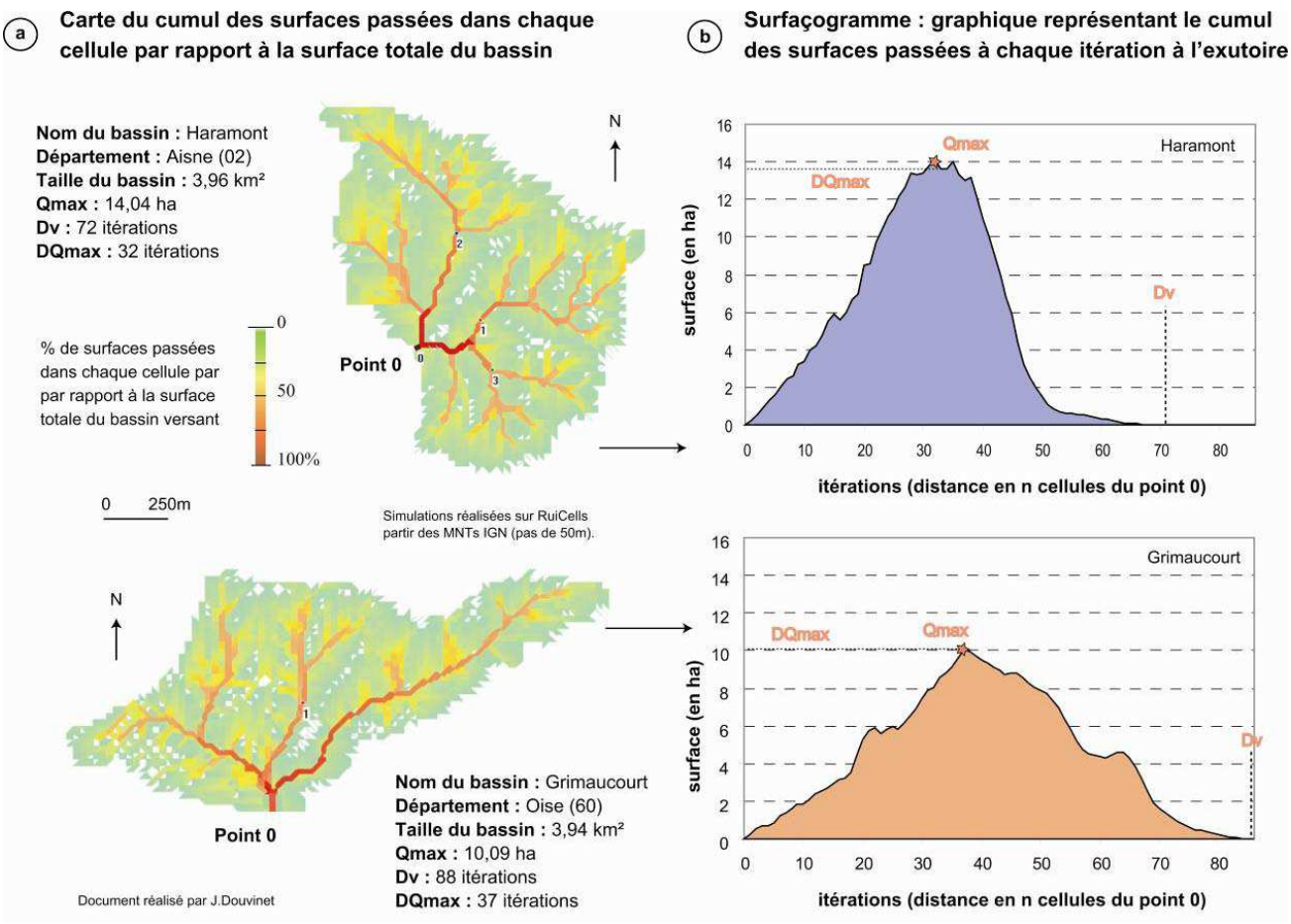


Fig. 8.8. Simulation des écoulements de surface sur deux bassins de même taille.

8.4.2. Indices morphosynthétiques créés à partir des surfaçogrammes

Afin de mieux évaluer le comportement surfacique des bassins étudiés, **plusieurs indices simples** et **rapides à calculer** sont proposés à partir des **surfaçogrammes** (fig. 8.9.) :

- le *débit moyen de surface* (**Qmoy)** se calcule en rapportant la surface du bassin à la distance nécessaire pour que la cellule la plus éloignée se vidange à l'exutoire (**Dv**) ;

- cette distance (**Dv**) s'apparente à un temps de concentration mais elle en diffère puisque les itérations correspondent à une unité spatiale (des distances) et non temporelle ;

- le *débit maximum de surface* (**Qmax)**, que l'on peut considérer ici comme un *pic de surface*, mesure **la longueur maximale de la bande de cellules équidistantes du point de mesure** (exutoire principal ou exutoires de sous bassins). **Qmax** est de la dimension d'une surface, mais il mesure en fait la variabilité d'une longueur de cellules au sein de la forme définie par le périmètre du bassin (fig. 8.9., Douvinet *et al.*, 2008) ;

- la *distance pour atteindre le débit de pointe* (**DQmax**) est indiquée en nombre d'itérations ;

- l'*intensité de la montée* (**Im**) rapporte le pic de pointe **(Qmax)** à la distance pour l'atteindre (**DQmax**). On peut ici quantifier l'intensité et la rapidité d'arrivée de la valeur (**Qmax**).

Tous ces indices permettent de **caractériser** la forme des surfaçogrammes et de **comparer la réponse des bassins en s'affranchissant de l'effet de taille**. On les désigne sous le terme d'*indices morphosynthétiques*, pour les distinguer des autres indices classiques (fig. 8.9.). On peut remarquer que ces indices sont proches des paramètres qui sont couramment utilisés comme référentiels en hydrologie (Llamas, 1993). On retrouve également certaines analogies dans l'*hydrogramme géomorphologique impulsionnel* (Serrat et Depraetere, 1997).

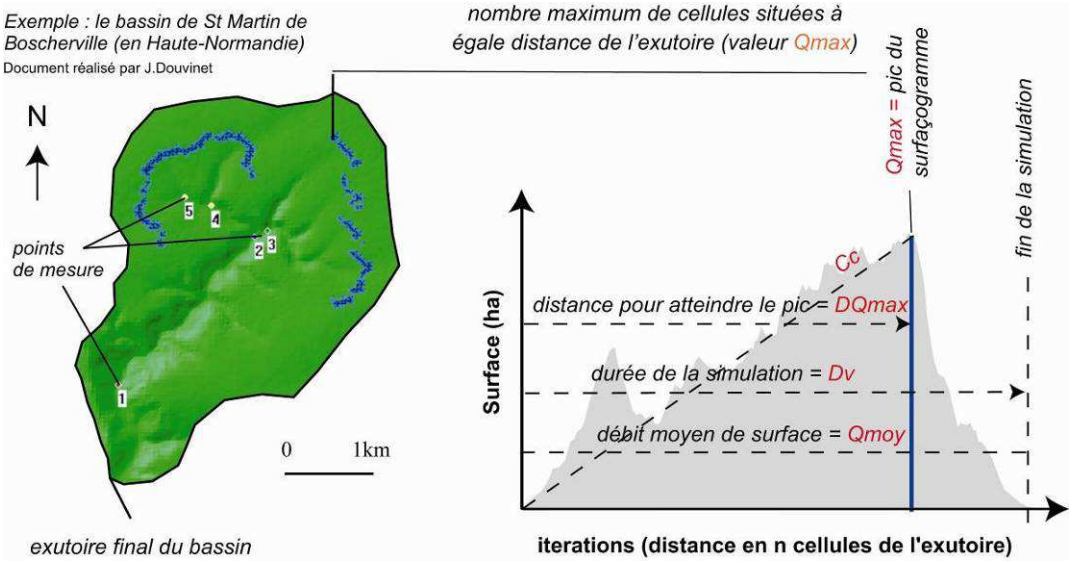


Fig. 8.9. Indices créés à partir des surfaçogrammes (modifié d'après Douvinet *et al.*, 2008).

8.4.3. Cartographies des isodistances (2D)

Un module a été développé par P. Langlois pour **cartographier les distances des cellules** par rapport à l'exutoire en suivant le plus court chemin d'écoulement. La carte met à jour des « *isodistances* », et non des isochrones, car seule la distance est prise en compte (fig. 8.10.).

Ces cartes présentent tout d'abord l'intérêt de connaître la distance des cellules en tout point de l'espace. Les cellules situées à proximité immédiate de l'exutoire sont en vert, alors que celles qui sont les plus éloignées sont en rouge foncé. La carte permet de compartimenter le bassin versant en sous unités au gré des classes colorées. La **structuration interne**, ici dans le bassin de St-Martin-de-Boscherville (fig. 8.10b), **apparaît très rapidement**.

Un graphique (le « *distançogramme* ») cumule le **nombre de cellules en fonction de leur distance à l'exutoire**. Les résultats obtenus par le surfaçogramme et le distançogramme sont totalement différents car c'est le nombre d'itérations qui est considéré dans le premier, et une longueur de trajectoire d'écoulement dans le second. **La comparaison des deux graphiques montre des écarts importants** pour un bassin théorique simplifié.

Les cartes en isodistances présentent également un autre intérêt : les cellules qui forment la valeur (**Qmax**) peuvent être identifiées. **On peut non seulement connaître la localisation de cette bande de cellules, mais on a désormais la possibilité d'appréhender l'organisation et la forme de cette longueur Qmax**. Sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville, les cellules de plusieurs sous bassins s'associent pour former le « *débit de pointe* » mesuré à l'exutoire.

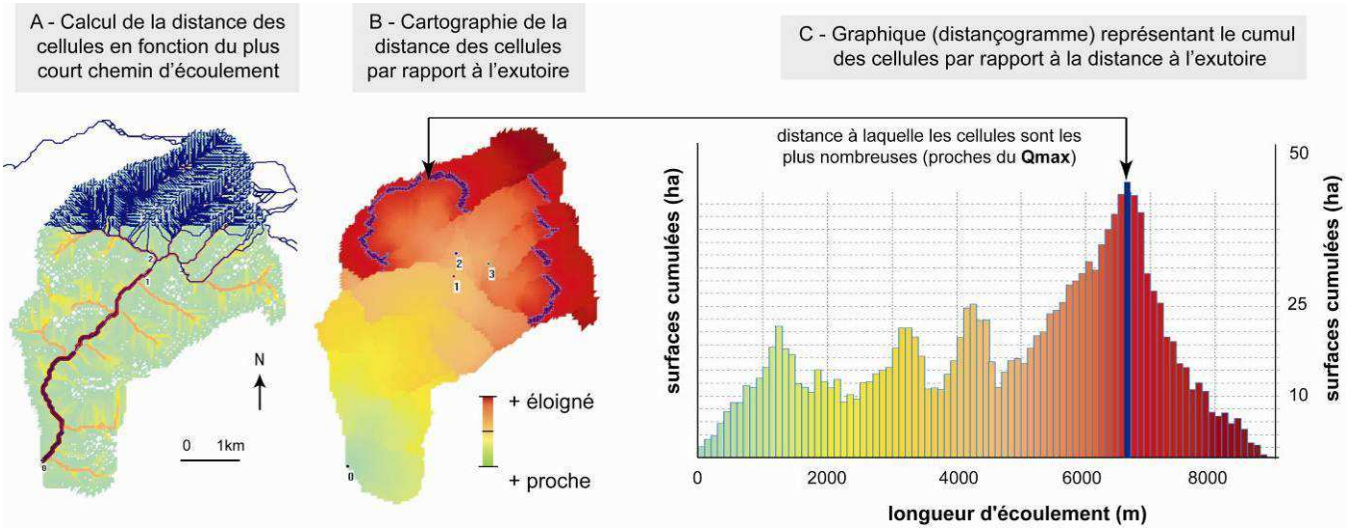


Fig. 8.10. Cartographie des distances des cellules par rapport à l'exutoire.

Il est également possible de cartographier différentes bandes de cellules (fig. 8.11.) situées à équidistance de l'exutoire. Les différents exemples choisis ci-dessous facilitent l'analyse de la structuration interne des bassins et des formes originales semblent se dégager. Les bandes de cellules sont choisies par l'utilisateur à partir du graphique réalisé (fig. 8.10.).

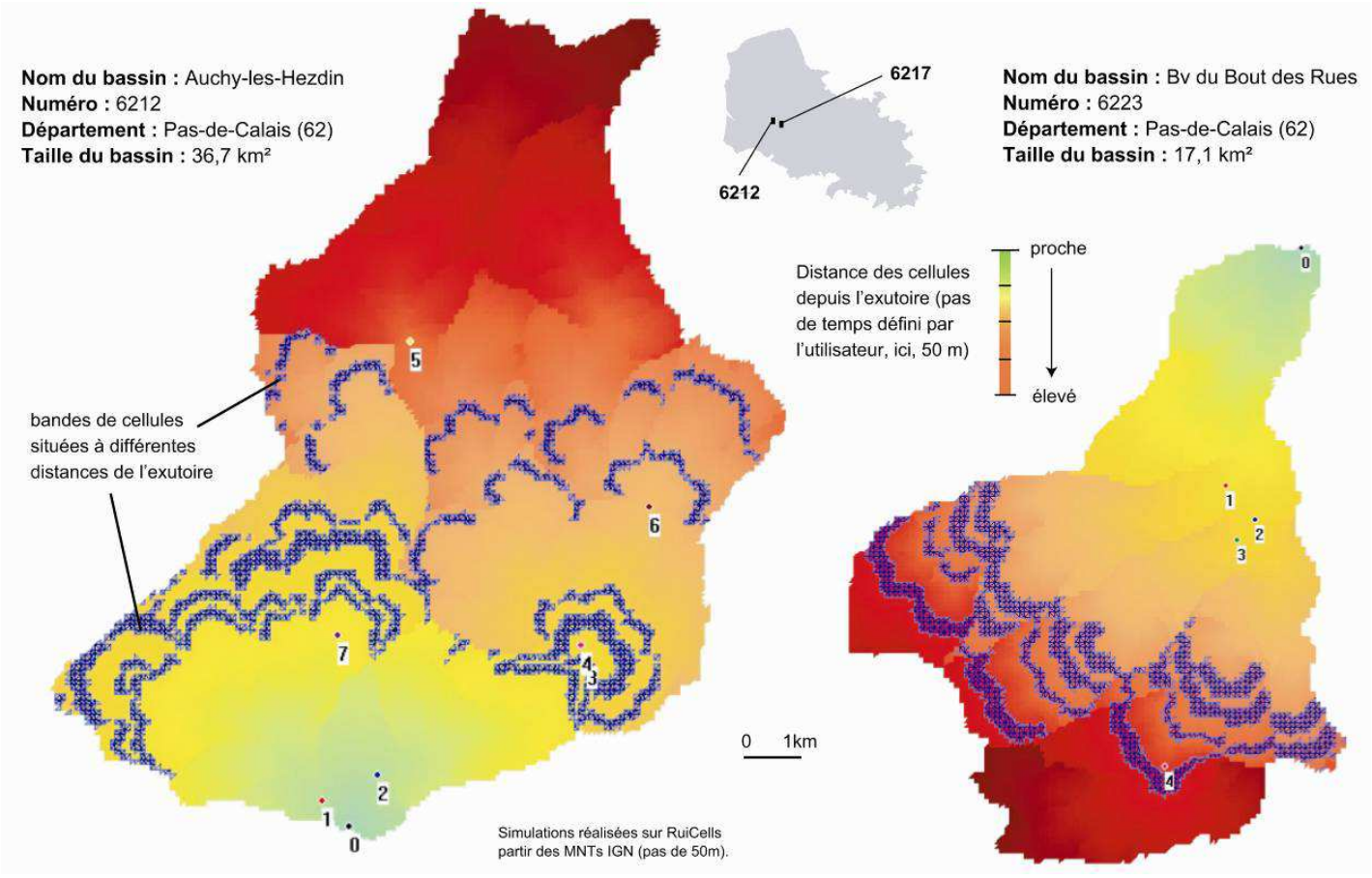


Fig. 8.11. Cartographie de plusieurs bandes de cellules situées à égale distance de l'exutoire.

8.4.4. Evaluer les effets de pente sur les écoulements de surface (3D)

La forme d'un bassin, ses pentes et son réseau hydrographique, sont cette fois-ci associés. On peut alors évaluer **l'efficacité morphologique** à travers une vision synthétique (fig. 8.12.).

Les simulations sont présentées sur les deux bassins précédemment sélectionnés (fig. 8.8.). Une pluie de 1mm est injectée dans les cellules qui ont un coefficient de ruissellement (Cr) de 100 %. Une cartographie, composée de classes colorées, présente, à nouveau, la structuration des axes d'écoulement à travers le cumul des surfaces passées dans chaque cellule (fig. 8.12.). En jouant sur les classes sélectionnées, on peut exclure certaines valeurs (fig. 8.12a.).

En intégrant la vitesse d'écoulement, les graphiques des surfaces passées ont plus de sens « *d'un point de vue hydrologique* » puisqu'ils vont tenir compte du relief et d'un cumul d'eau sur les cellules. Les graphiques, appelés « *morphogrammes* », simulent désormais des réponses de surfaces avec des estimations de débits en ha.min^{-1}. « *Le processus itératif est modifié par l'adjonction d'un algorithme temporel où le pas de temps vaut une minute par défaut* » (Gaillard *et al.*, 2008). Le temps sert aussi à modéliser les vitesses des écoulements surfacique ou linéaire qui sont variables en fonction des différents paramètres retenus (Annexe 8.2.). **Six constantes définissent la vitesse de l'écoulement dans chaque cellule en tenant compte de la hauteur d'eau, qui elle-même dépend de la pente.** Une variation de la hauteur d'eau entraîne ainsi une modification de la vitesse, et en corollaire du débit en sortie (Delahaye, 2002).

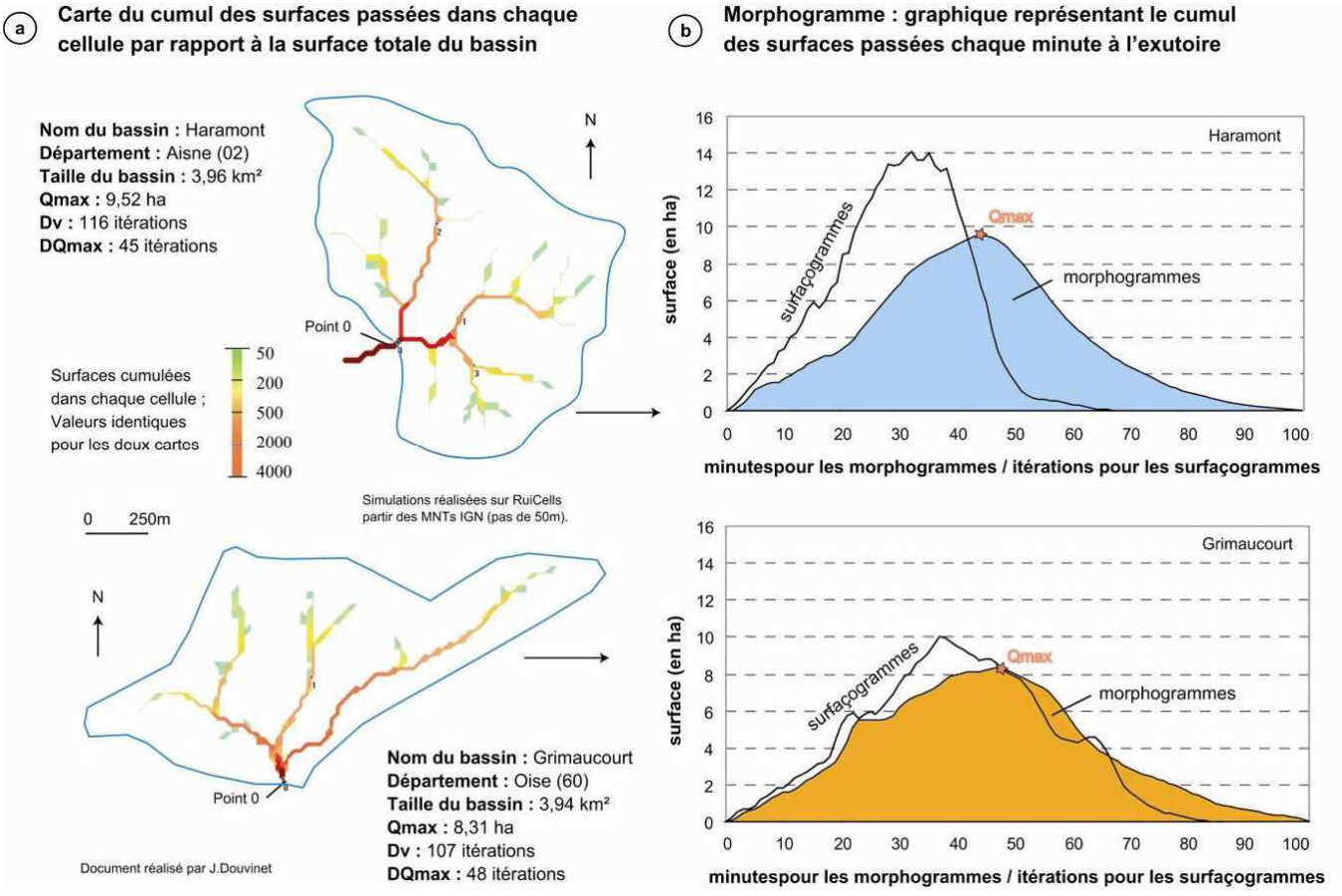


Fig. 8.12. Simulation des écoulements de surface avec l'effet de la pente sur deux bassins.

En général, les graphiques ont des formes ramassées et plus étalées sous l'effet des pentes (Douvinet *et al*., 2006a). Plus les pentes faibles sont importantes, et plus la taille des bassins s'agrandit, plus les écarts paraissent élevés par rapport aux courbes des surfaçogrammes. Sur l'exemple commenté ici (fig. 8.12b.), l'influence de la pente est bien plus élevée dans le bassin d'Haramont, dont l'efficacité structurelle du réseau hydrographique est nettement amoindrie, que dans le bassin de Grimaucourt.

Les écarts entre les courbes du morphogramme et celles du surfaçogramme, permettent de quantifier les effets du système de pentes par rapport aux effets de forme et de réseau.

8.4.5. Sensibilité des résultats

L'**incidence de la résolution** du Modèle Numérique de Terrain (**MNT**) a été testée sur un petit bassin[2] de 5,1 km² (fig. 8.13.). Les simulations sont proposées à partir d'un MNT au pas de 50 m et d'un MNT au pas de 20 m (données fournies par le Conseil Général du Calvados).

Les cartes des cumuls de surfaces montrent que **les axes d'écoulement sont très proches** sur les deux bassins, même si le MNT au pas de 20 m est plus précis. Les graphiques obtenus à l'exutoire présentent, en revanche, une forte variabilité. Le MNT au pas de 20 m allonge la durée de la simulation et il étale la réponse surfacique de ce sous bassin, ce qui ne semble pas surprenant. Ces tests confirment que les simulations sont **sensibles** à la résolution du MNT choisi. Néanmoins, en choisissant une **MNT** au pas de 50 m pour toutes les simulations à venir, on ne s'expose pas à un éventuel biais méthodologique. A court terme, d'autres tests devront être menés sur différents bassins versants et avec différentes discrétisations du MNT, pour évaluer la sensibilité des réponses hydrologiques mesurées.

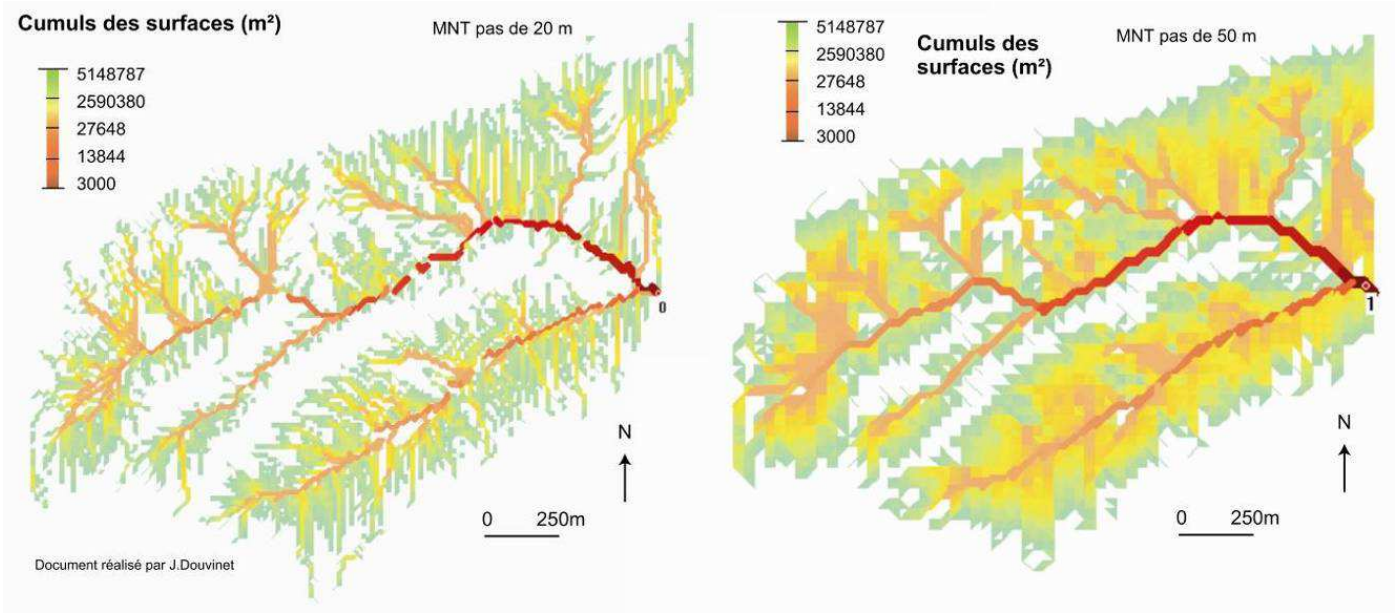


Fig. 8.13. Cartographie des écoulements de surface sur deux MNT de résolution différente (20 m et 50 m) sur un bassin versant de 5,1 km².

[2] Ce bassin se situe en amont du Tortillon (14), bassin de 11,4 km², qui est un bassin de référence équipé par le laboratoire Géophen depuis 2005. Le choix de ce bassin n'a pas d'importance ; c'est sur les résultats obtenus qu'il faut s'attarder.

Associé à tous ces développements méthodologiques apportés à l'automate *RuiCells*, un *tutoriel* (Annexe 8.3.) a été réalisé pour rappeler les différentes étapes nécessaires pour passer d'un MNT à la simulation des écoulements de surface.

Conclusions du chapitre 8

L'automate *RuiCells* a donc été développé pour simuler l'influence de la morphologie sur la dynamique des écoulements de surface. **Il répond aux quatre objectifs initiaux** :

► c'est un outil d'analyse **facile à comprendre et simple à implémenter** ;

► le **rôle de chaque composante morphologique** (forme, réseaux, relief) peut désormais être évalué de manière **séparée,** puis de manière **synthétique,** à travers les échelles ;

► la construction spatiale de la réponse hydrologique est appréhendée **en tout point de l'espace**, depuis les échelles locales jusqu'à l'échelle globale. En jouant sur les gammes de classes colorées, différentes cartographies accompagnent cette lecture multiscalaire ;

► des indices **morpho-synthétiques** sont créés à partir des réponses mesurées à l'échelle globale. Ces indices peuvent également être calculés en tout point de l'espace, et on peut mieux **décomposer la réponse globale** en identifiant les contributions des sous unités qui composent le système spatial nommé « *bassin versant* ».

Cet **outil de simulation** poursuit les efforts menés en hydrologie depuis plusieurs années (Tarboton *et al*., 1991 ; Depraetere et Moniod, 1991 ; Tarboton, 1997 ; Palacios-Vélez, 1998). Il présente une structure particulière, en particulier un maillage triangulaire régulier, où trois types d'écoulements (surfaciques, linéaires, ponctuels) ont été dissociés. **Cet outil d'analyse se démarque aussi des autres approches par l'absence de discontinuités dans la circulation des écoulements sur les cellules**.

***RuiCells* prétend se rapprocher de la réalité par émergence d'une dynamique globale** d'un bassin à partir du fonctionnement local, simplifié, de chaque cellule. Cet automate offre l'avantage de traiter l'espace à un niveau de **détail** considérable, ce qui en fait également un outil compatible avec la majorité des bases de données spatiales. Il est également **dynamique**, offrant une grande variété de situations et de processus, et fait très facilement le lien entre les **processus** (règles de transition) et les **structures** qu'il génère (Ménard *et al*., 2004).

Une fois ce cadre théorique et méthodologique présenté, les résultats obtenus sur les 189 bassins versants touchés par des « *crues rapides* » (1983-2005) peuvent être commentés.

Chapitre 9

Influence des structures spatiales sur la dynamique hydrologique : émergences et jeux d'échelles

Introduction	**p. 242**
9.1. Effets de forme et émergence de « *signatures surfaciques* »	**p. 242**
9.2. Mesurer l'efficacité structurelle d'un réseau en tout point de l'espace	**p. 248**
9.3. Influence des pentes sur le système morphologique	**p. 258**
Conclusions du chapitre 9	**p. 263**

Sorties de simulations numériques
Source : Logiciel RuiCells

Introduction

Le but recherché est désormais de mesurer les effets des interactions spatiales, identifier les phénomènes d'émergence depuis les échelles locales, et mesurer l'influence des variables morphologiques sur la réponse hydrologique des bassins. La démonstration s'appuie sur un échantillon de **185 bassins versants**[1] sur lesquels on a placé un point de mesure à l'exutoire. Pour les bassins de moyenne et de grande taille, d'autres points de mesure ont été ajoutés aux exutoires des principaux sous bassins. Au final, l'analyse porte sur **422** points de mesure.

L'objet de ce chapitre est de répondre aux trois questions suivantes :

► quelle est la **dynamique** induite par les interactions entre les différentes composantes morphologiques (forme, réseau, pente) ?

► **peut-on quantifier l'efficacité des différentes structures et traquer des « *anomalies* » susceptibles de déterminer des comportements originaux (homothétie, compacité) ?**

►l'échelle du *« bassin versant »* est-elle pertinente pour mesurer cette efficacité ? Si **non**, **quel est le niveau d'observation le plus approprié ?**

Les résultats des simulations sont d'abord étudiés dans un espace à deux dimensions à l'échelle globale (§ 9.1.). Rapidement, il devient nécessaire de se focaliser sur la structuration interne du réseau à l'échelle locale (§ 9.2). L'incidence des pentes est ensuite étudiée par rapport aux effets de forme et de réseau dans un espace à trois dimensions (§ 9.3.) Le rôle du *« système morphologique »* est progressivement évalué à travers ce jeu de va-et-vient entre les niveaux locaux et les niveaux supérieurs.

Le **caractère dynamique** de l'approche proposée doit permettre de fournir des **éléments d'explication** sur la **réactivité** de certaines configurations spatiales, et de **mieux comprendre la manière dont s'élabore le débit de surface dans le temps et dans l'espace**.

9.1. Effets de forme et émergence de « *signatures surfaciques* » (2D) à l'échelle globale des bassins versants

9.1.1. Mise à jour de la structuration interne des bassins

Les premières simulations consistent à comptabiliser le cumul des surfaces transitant par chaque point de mesure et à chaque itération, et ce, tout en ignorant la vitesse d'écoulement. La cartographie des cumuls de surfaces passées dans chaque cellule permet de **faire émerger la structure interne des bassins au cours du processus itératif**. Il suffit de s'appuyer sur les bassins SMB (St-Martin-de-Boscherville) et ESS (Essômes-sur-Marne) pour illustrer ce propos. Le graphique qui présente le cumul des surfaces passées à l'exutoire et à chaque itération (le « *surfaçogramme* ») facilite l'analyse de la réponse hydrologique qui se structure au sein du bassin. On peut ensuite affiner son interprétation en localisant différents points de mesure en fonction des contributions des sous bassins que l'on veut identifier (fig. 9.1.).

[1] Sur les 189 bassins touchés, 4 bassins, situés à l'interface entre deux régions, ont été exclus car des *« trous »* existent dans les Modèles Numériques de Terrain (MNTs) qui présentent des limites régionales différentes.

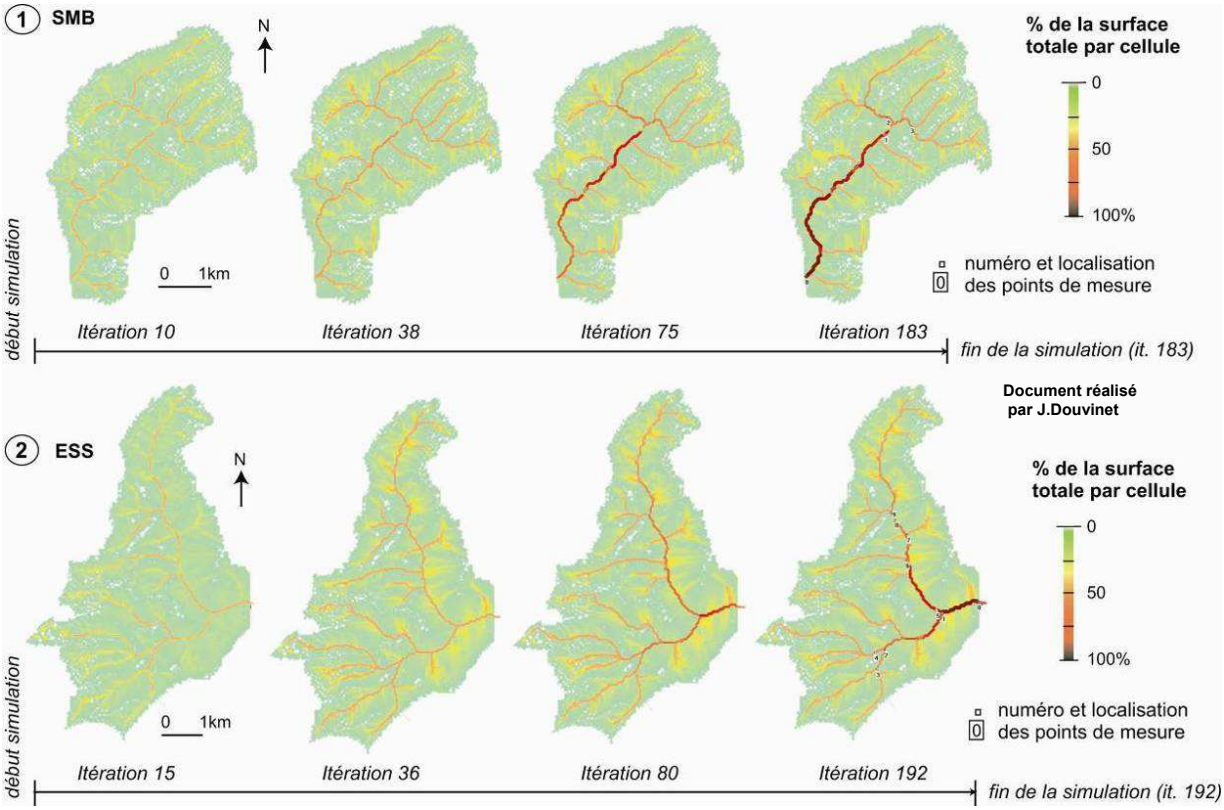


Fig. 9.1. Emergence de la structuration des axes d'écoulement au cours du processus itératif.

9.1.2. Effets de taille et lois d'échelle au niveau macro

Les indices morphosynthétiques ont ensuite été calculés sur les 422 points de mesure répartis sur les 185 bassins versants retenus pour cette étude. Les indices Qmax (la pointe de débit du « *surfaçogramme* »), Dv (distance nécessaire pour que la surface de la cellule la plus éloignée passe à l'exutoire = durée de la simulation) et Qmoy (débit moyen) (cf. chapitre 8) ont été calculés et regroupés dans un fichier commun. Les premiers résultats montrent la **dépendance** des indices **à la taille** des bassins à une échelle globale. La relation entre le débit maximum de surface (Qmax) et la surface (A) des bassins (r^2=0,83) donne, par exemple, une loi puissance de type $Qmax= \alpha A^{\beta}$, avec α=0,32 et $^{\beta}$=0,54 (fig. 9.2.).

Les valeurs du débit moyen Qmoy (r^2=0,90) ainsi que la distance de vidange Dv (r^2=0,88) ont aussi tendance à augmenter lorsque la taille des bassins versants s'accroît. Les indices augmentent toutefois de manière non proportionnelle avec la taille. Les équations traduisent des **lois puissances** *(scaling laws)*, avec $^{\beta}$ proche de 0,5, qui prennent logiquement l'allure de droites sur des graphiques de type *log-log* (Mantilla *et al.*, 2005 ; fig. 9.2.). Ces lois traduisent l'existence de **non linéarités** pour ces **phénomènes** qui sont **invariants d'échelle** (Pumain, 2002 ; Dauphiné et Provitolo, 2003). Elles sont ainsi « *révélatrices de l'existence de contraintes qui pèsent sur l'organisation des systèmes* » (West, 2006).

Ces relations confirment la présence de lois d'échelle déjà bien connues en hydrologie. Elles sont notamment évoquées sous la forme de relations asymptotiques dans de nombreux travaux (Menabde *et al.*, 2001 ; Mantilla *et al.*, 2005 ; Snell *et al.*, 2004). Les résultats obtenus

pour la relation entre la distance de vidange et la taille des bassins sont à rapprocher de la **loi de Hack** (1957), qui est de type $Lmax=1,4A^{0,5}$, avec Lmax la longueur du drain principal. On peut directement faire le lien avec cette loi, où la longueur du drain principal et la surface étaient aussi reliées par une loi puissance (cf. chapitre 7). L'ensemble des travaux postérieurs ayant appliqué la loi de Hack (Gray, 1961 ; Mueller, 1973) vérifie la pertinence de cette loi.

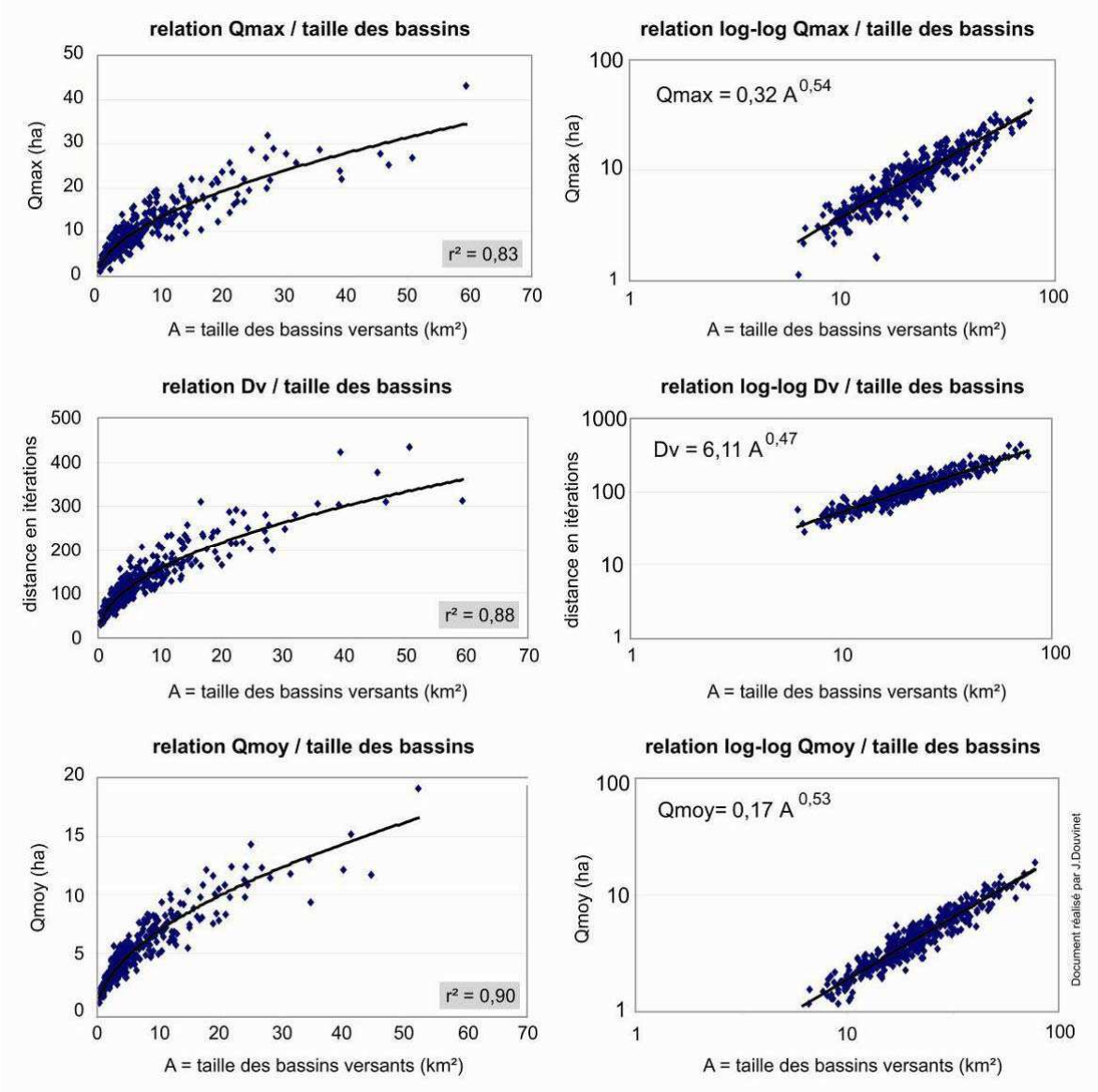


Fig.9.2. Relations entre Qmax (point de débit du surfaçogramme), Dv (durée de la simulation) et Qmoy (débit moyen) versus la taille des bassins (Douvinet *et al.,* 2007b).

Les relations ne sont pourtant pas aussi simples. Les écarts entre des bassins de même taille passent parfois du simple au double pour certains paramètres, et en particulier pour la distance nécessaire pour atteindre Qmax (fig. 9.3.). Plus la taille des bassins augmente, plus les formes et les configurations internes des réseaux hydrographiques présentent une **grande diversité** ; les écarts ont ainsi tendance à se creuser lorsque la taille s'accroît.

Il devient alors nécessaire de mieux appréhender la construction des « *surfaçogrammes* » en décomposant la réponse globale et en **évaluant les contributions des sous unités** constituant

l'entité « *bassin versant* ». Pour cela, les surfaçogrammes des sous bassins ont été replacés par rapport à celui mesuré à l'exutoire final, soit le point 0 (Annexe 9.1.). On peut ainsi visualiser les apports des différentes unités de manière plus précise dans l'espace.

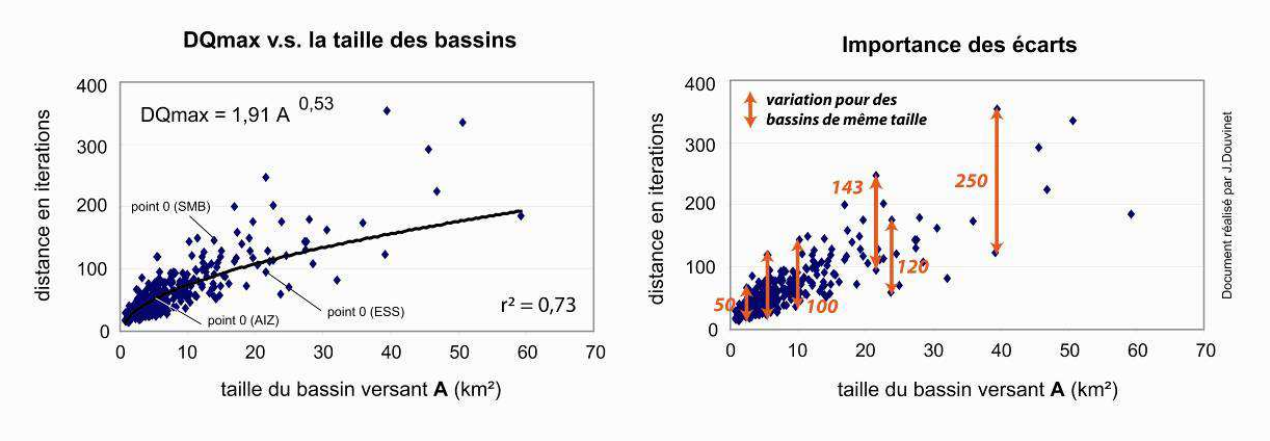


Fig.9.3. Importance des écarts entre DQmax versus la taille des bassins (Douvinet *et al.*, 2007b).

9.1.3. Des « *signatures surfaciques* » révélatrices des configurations internes

Le but recherché ici est de **caractériser la réponse globale par une « *signature surfacique* »** qui prend en compte la structuration des axes d'écoulement et la distance des différents sous bassins par rapport à l'exutoire final. Cette deuxième étude porte plus spécifiquement sur quatre bassins récemment touchés par des « *crues rapides* » (fig. 9.4.) Deux bassins ont été choisis car leur structuration interne est complètement différente, alors qu'ils ont une taille similaire : St-Martin-de-Boscherville (SMB) et la Lézarde amont (LEZ). Les bassins Aizelles (AIZ) et Essômes (ESS), de taille totalement différente, ont des formes compactes tandis que les bassins SMB et ESS paraissent plus allongés (fig. 9.4.).

Les résultats des simulations confirment, à première vue, **l'effet d'échelle** précédemment démontré. Le bassin AIZ (4,1 km²) se vidange le plus rapidement (en 88 itérations), et le pic de surface (10,6 ha) est atteint en 53 itérations. En revanche, la surface de la cellule la plus éloignée du plus grand bassin versant (ESS, 21,3 km²) nécessite une distance de 192 itérations pour atteindre l'exutoire final (tab. 9.1.).

Les cartographies permettent de visualiser la construction de la réponse hydrologique de surface à travers les échelles. Sur le bassin ESS (21,3 km²), les écoulements sont alimentés par deux sous bassins principaux dont les pics respectifs de 12,9 et 12,1 ha arrivent « *au même moment* » pour former le pic de 25,1 ha mesuré à l'exutoire. Des apports constants et réguliers des différentes sous unités expliquent le pic observé à l'exutoire final (fig. 9.5b.).

L'analyse souligne néanmoins la présence d'anomalies car les pics des surfaçogrammes ne sont pas toujours proportionnels à la taille des bassins. Cela se vérifie parfaitement entre les bassins SMB et LEZ (fig. 9.3.). Alors que la taille de SMB est plus grande, le pic de surface (Qmax) est moins élevé (16,82 ha) et la distance pour que la cellule la plus éloignée arrive à l'exutoire est aussi plus importante (182 itérations) par rapport à LEZ (fig. 9.5c.). La distance pour avoir le pic de surface (DQmax) est d'ailleurs plus courte (tab. 9.1.) sur le bassin ESS (21,3 km²) que sur LEZ et SMB (~ 14 km²).

Noms des bassins versants	Surface (km²)	Qmax (ha)	Dv (It.)	DQmax (It.)
Essômes sur Marne [ESS]	21,32	25,06	192	97
Lézarde amont [LEZ]	13,41	18,16	152	100
Saint Martin de Boscherville [SMB]	14,30	16,82	182	129
Aizelles [AIZ]	4,11	10,58	88	53

(Qmax : débit maximum de surface (en hectares) lors de la simulation ; Dv : Temps de concentration ou nombre d'itérations (>It.) pour vidanger le bassin ; DQmax : Nombre d'itérations pour atteindre le débit de pointe Qmax).

Tab. 9.1. Présentation des 4 bassins expérimentaux et valeurs des indices morphosynthétiques.

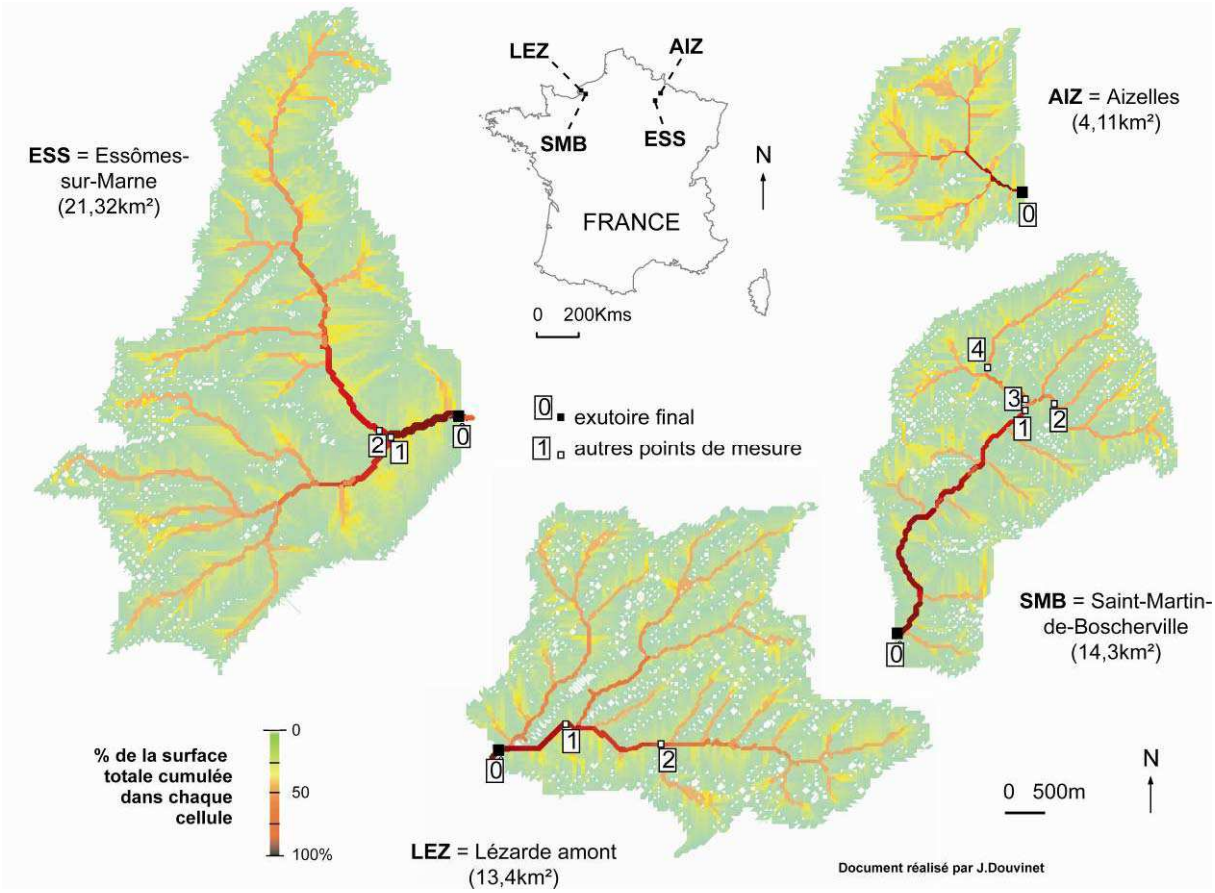


Fig. 9.4. Cartographie des cumuls de surfaces passées en chaque cellule pour les 4 bassins.

La courbe du surfaçogramme de SMB, indiquant un comportement **chaotique,** s'explique par l'arrivée désorganisée des surfaces à l'exutoire et par une organisation non hiérarchique du réseau hydrographique (fig. 9.5d.). Cette configuration réduit le pic de surface et allonge surtout les temps de parcours au sein du bassin versant.

En revanche, en amont du point 1 (SMB), la structuration du réseau est très **efficace** avec la convergence de tous les drains vers la même direction, ce qui favorise une **arrivée massive et rapide des surfaces.** Cet effet est d'autant plus renforcé par la forme triangulaire du bassin. Afin de mieux aborder l'efficacité de cette partie amont, la bande de cellules générant le pic du débit de surface (**Qmax**) a aussi été cartographiée (fig. 9.6.). Les cellules forment un arc de cercle autour du sous bassin en amont du point 3, et elles se cumulent avec d'autres cellules surfaciques qui se situent à égale distance sur quatre autres sous bassins en amont du point 2.

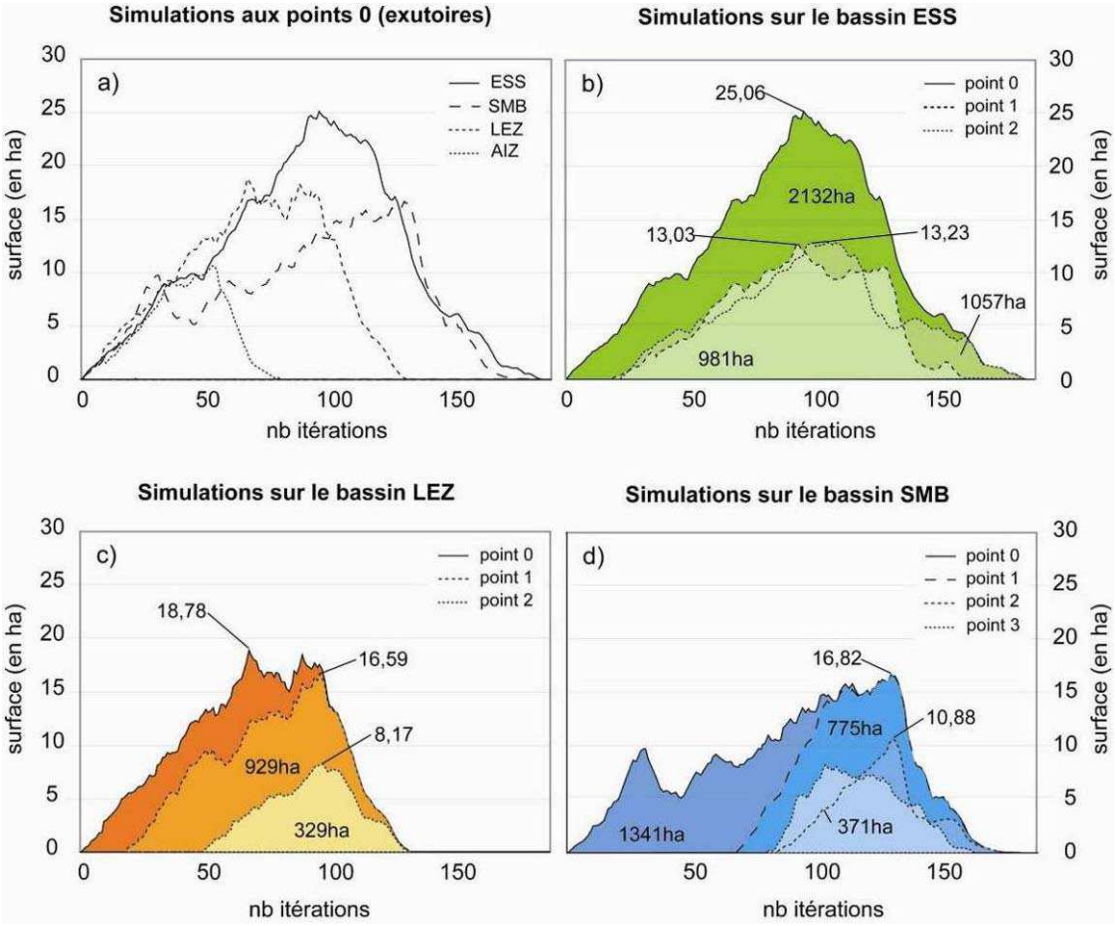


Fig. 9.5. *Surfaçogrammes* des quatre bassins et contributions des différents sous bassins.

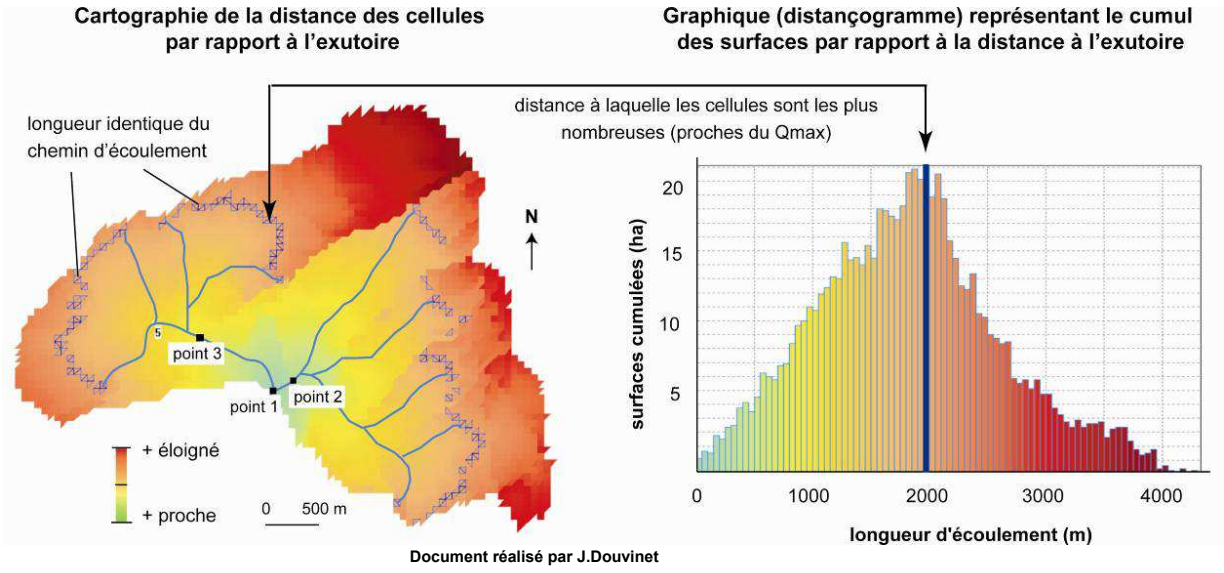


Fig. 9.6. Bande de cellules situées à égale distance du point 1 (amont de SMB).

Ce travail permet finalement de mieux comprendre la signature surfacique induite par les configurations internes des bassins versants. Le bassin LEZ présente une organisation particulière de son réseau hydrographique ; l'ensemble des drains est orienté vers le même

point, ce qui implique une perte d'énergie minimale pour acheminer les surfaces. Ce réseau présente une forte homothétie interne (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997), avec une structure conforme aux rapports hortoniens, ce qui le rend efficace. La distribution des surfaces étant la même d'un sous bassin à un autre, le « *surfaçogramme* » prend une allure triangulaire qui est proche de l'hydrogramme unitaire. A l'opposé, le comportement surfacique du bassin SMB évolue dans l'espace, avec une partie amont efficace, mais pénalisée par une partie aval « *inerte* » qui sert simplement de « *corps d'accompagnement* ». La partie amont de SMB rappelle les systèmes auto-organisés, caractérisés par une perte d'énergie minimale constante et égale en tout point du bassin (Bak, 1999). **En restant à l'échelle globale, l'efficacité de la partie amont était masquée, ce qui justifie le jeu de va-et-vient entre le local et le global.**

9.1.4. Remise en cause du « *bassin versant* » comme unité homogène

Les exemples précédents montrent finalement que la forme d'un bassin, si elle est étudiée indépendamment de la structure du réseau, n'a pas de réelle signification. **Ce constat remet en cause la notion d'homogénéité que sous tend la notion de « *bassin versant* ». En effet, le comportement surfacique global ne traduit pas l'efficacité de certaines configurations internes.** Dans le cas du bassin de St-Martin-de-Boscherville, c'est la partie amont qui joue uniquement un rôle sur le pic de surface mesuré à l'exutoire final. Le reste du bassin sert de corps d'accompagnement ; il tend alors à masquer une telle efficacité à l'échelle globale.

Le comportement surfacique peut également fluctuer à travers les échelles. Les écarts de certains bassins par rapport aux lois d'organisation universelles trouvent ici une explication. La signature globale ne peut alors se réduire à la somme des parties internes. La distance, les interactions entre les surfaces et les contributions des différents sous bassins complexifient le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant depuis les échelles locales.

Plus que la taille des bassins, ce sont les connexions entre les surfaces et les réseaux et leur distance à l'exutoire qui permettent de comprendre **l'organisation fonctionnelle des bassins.** L'automate permet de quantifier cette influence sur la réponse hydrologique de surface qui est longtemps restée théorique (Lambert, 1996). **Il est désormais nécessaire de traquer toutes les « *anomalies* » internes que peut masquer la réponse mesurée à l'échelle globale.**

9.2. Mesurer l'efficacité structurelle d'un réseau en tout point de l'espace : une nouvelle méthode de caractérisation

9.2.1. A la recherche d'un indicateur synthétique

A la lecture des résultats précédents, une troisième étude a été menée pour quantifier la fonctionnalité d'un réseau. Afin de détecter les configurations spatiales les plus efficaces tout en s'affranchissant de l'effet de taille, un indice **P** est proposé en rapportant le pic de surface (**Qmax)** mesuré sur chaque cellule, à la surface (**A)** située en amont (Delahaye, 2002) :

$$P = \frac{Q_{\max}}{\mathrm{A}} \times 100$$

La taille des bassins et l'indice P présentent une forte relation non linéaire (r^2=0,78) et cette fois-ci, **l'effet d'échelle** est **inverse** avec une valeur $^{\beta}$ négative (-0,46) : plus la taille du bassin augmente, plus la valeur P diminue car la surface augmente plus vite que Qmax (fig. 9.7a.). Il est également possible de **suivre la trajectoire de l'indice P au sein du bassin versant.** Si le réseau reste hiérarchisé, P va diminuer lentement ; en revanche, si le réseau est dispersé ou si la forme du bassin s'allonge, P risque de chuter rapidement car la valeur Qmax stagne.

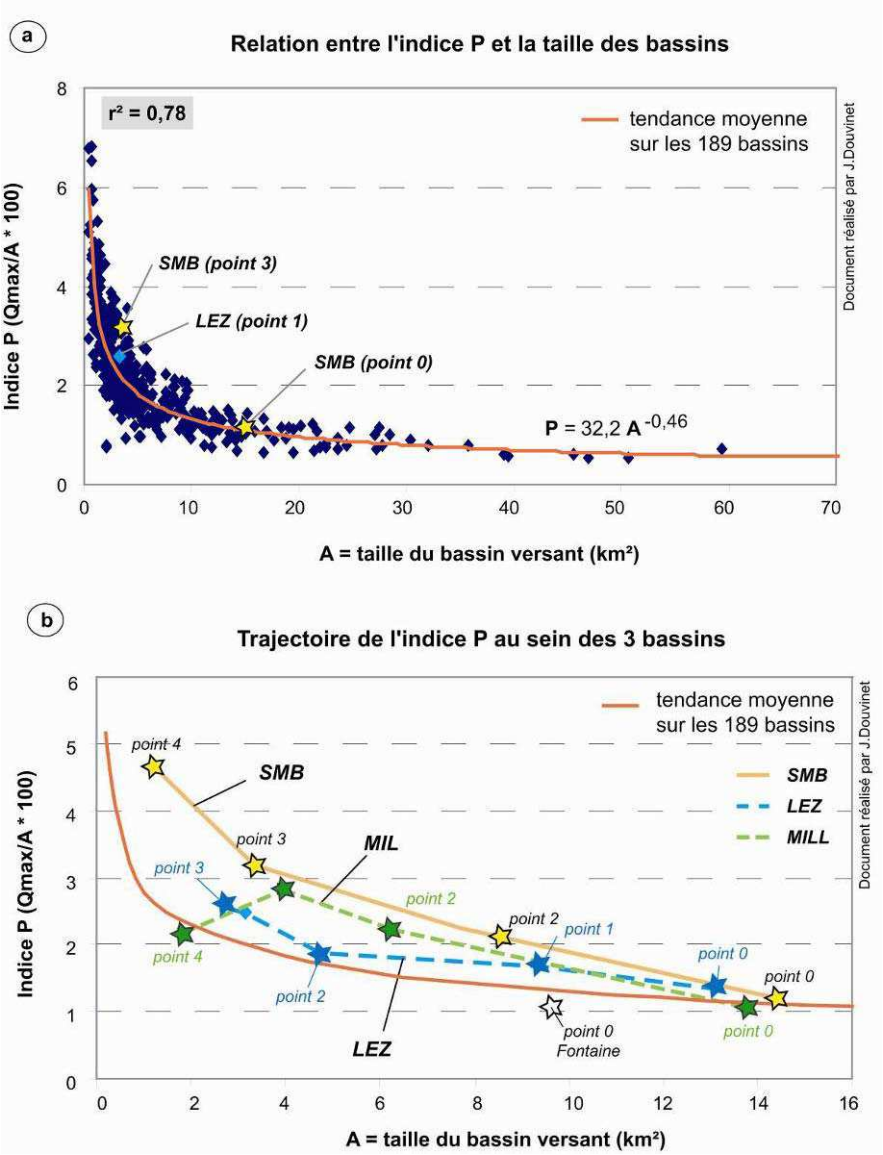


Fig. 9.7. L'indice **P** versus la taille des bassins versants.

Pour s'en convaincre, trois bassins de taille similaire (~14 km²) ont été étudiés. **L'efficacité structurelle de la partie amont de St Martin donne un indice P élevé** ; parmi les valeurs mesurées sur les 422 points de mesure, les indices mesurés aux exutoires des points 3 et 4 font partie des plus importants. En revanche, la forme plus allongée de la partie aval fait progressivement chuter l'indice P jusqu'à l'exutoire (fig. 9.7b.). Sur la Lézarde, si les valeurs sont faibles, l'indice P diminue régulièrement et il se stabilise même dans la partie centrale, symbole de l'homothétie interne. Sur Milleville, une zone plus efficace semble apparaître au niveau du point 3 alors que les valeurs amont font partie des indices les plus faibles (fig. 9.8.).

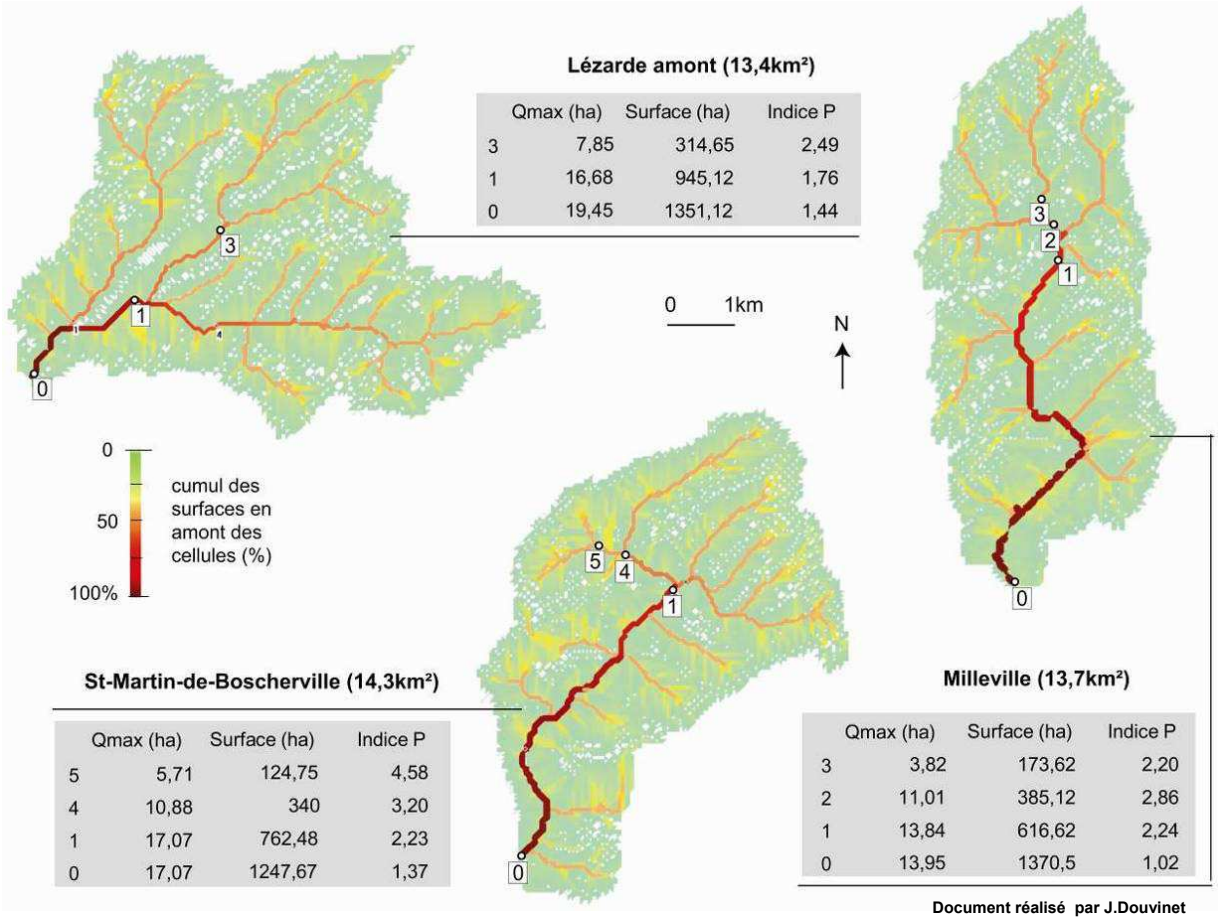


Fig. 9.8. Trajectoires de l'indice **P** au sein de bassins de même taille.

L'indice P permet de bien mettre en avant toutes les « *anomalies* » dans la structuration hiérarchique interne des bassins versants. On remarque, par ailleurs, que les valeurs de l'indice P présentent une grande amplitude pour les bassins inférieurs à 10 km², mais que les écarts ont tendance à **s'uniformiser** pour les bassins dont la taille dépasse les 20 km². **Cette observation prouve ainsi que les petits bassins versants, présentant une grande variabilité des configurations internes, dérogent aux lois d'organisation universelles**. D. Delahaye (2002) rappelle que *« les lois hortoniennes d'organisation des réseaux hydrologiques ont été vérifiées pour des bassins de grande taille. En revanche, pour des bassins plus petits, parcourus par des vallons secs comme dans le cas du Pays de Caux, les lois à de rares exceptions, ne sont plus valides ».*

9.2.2. Proposer un nouvel indice d'efficacité structurelle : l'indice IE

L'indice P présente l'inconvénient de chuter très rapidement depuis les zones sources, ce qui amène à proposer un nouvel Indice d'Efficacité, noté **IE**, qui rapporte la valeur **Qmax** à la **racine carrée de la surface amont**. Les relations puissances trouvées auparavant corroborent l'usage de la racine carrée (fig. 9.9.). Qmax étant rapporté à une longueur (la racine carrée est égale au diamètre moyen d'une surface), l'indice devient totalement **adimensionnel** :

$$IE = \frac{Q_{max}}{\sqrt{A}} \times 100$$

Il convient d'apporter **quelques précisions** sur les valeurs obtenues. Cet indice permet de comparer le pic du surfaçogramme (bande de cellules situées à égale distance de l'exutoire) au diamètre moyen du bassin. Lorsque les valeurs sont proches de 100, cela veut dire que la bande de cellules s'organise de la manière la plus optimale possible, se calant sur le diamètre moyen du bassin tout en étant situé à égale distance de l'exutoire. **On peut ainsi définir une certaine efficacité du réseau au sein d'une forme donnée.**

Les résultats obtenus pour le bassin situé en amont de St-Martin-de-Boscherville (fig. 9.9.) servent d'exemple pour affiner les explications sur cet indice : Qmax (5,71 ha) est rapporté à la racine carrée de la surface amont (124 ha), ce qui donne un indice IE de 51,2. Les valeurs supérieures à 50 (soit au-dessus de la moitié du diamètre moyen) sont celles sur lesquelles on se focalise plus spécifiquement car cela indique une fonctionnalité relativement élevée.

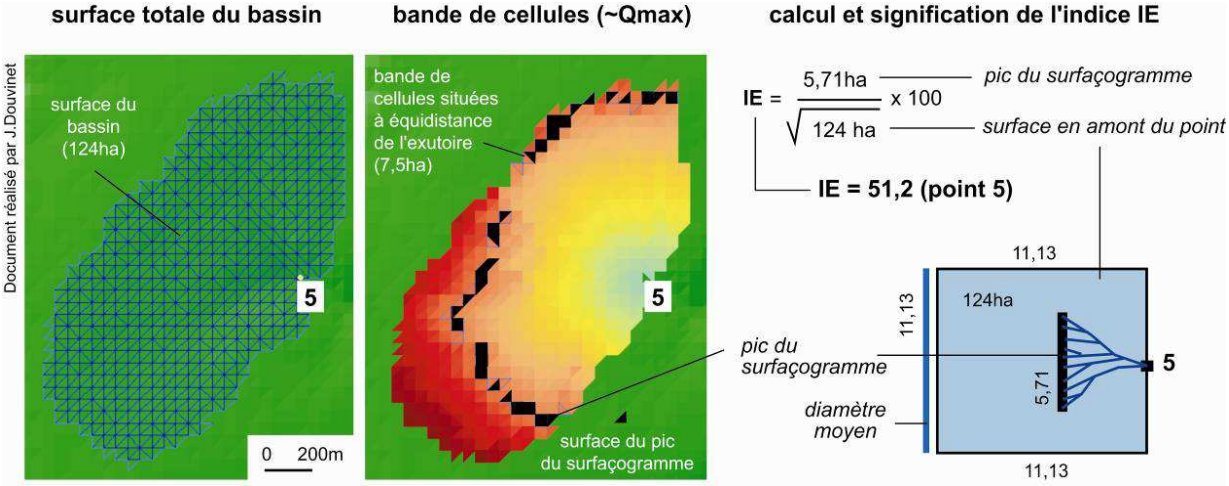


Fig. 9.9. Calcul et signification des valeurs obtenues avec l'indice IE.

La taille des bassins versants et l'indice IE sont faiblement corrélés (r^2=0,02) car les valeurs sont fortement dispersées, notamment pour les entités de petite taille (fig. 9.10a.). Les écarts restent importants à travers les échelles spatiales. La faible amplitude des indices IE pour les grands bassins peut s'expliquer par la faiblesse de l'échantillon (9 points de mesure pour des surfaces supérieures à 30 km²).

Il est, à nouveau, possible de suivre la trajectoire de l'indice IE au sein des trois bassins précédemment sélectionnés. Les bassins SMB, LEZ et MILL présentent trois trajectoires totalement différentes. L'indice est très élevé au point 1 sur le bassin SMB. La confluence de plusieurs sous bassins sur le bassin MIL, au point 2, confirme une certaine efficacité (IE = 55), mais la valeur chute tout aussi rapidement que sur SMB à cause de la partie aval, allongée, qui réduit l'efficacité du réseau. Les valeurs sur le bassin LEZ sont constantes, augmentant légèrement jusqu'au point 1 et stagnant jusqu'au point 0 (fig. 9.10b.). **Ce résultat confirme la forte homothétie interne de ce bassin versant.**

La cartographie des indices calculés sur chaque cellule permet de mesurer cette efficacité structurelle du réseau **en tout point de l'espace,** tout en offrant la possibilité de **comparer les valeurs obtenues sur les différents bassins** puisque l'indice est adimensionnel (fig. 9.11.). La partie amont de SMB ressort comme une structure « *hyper-efficace* », avec un indice IE de 74 : aucune cellule ne fait état d'une telle efficacité au sein des 185 bassins étudiés.

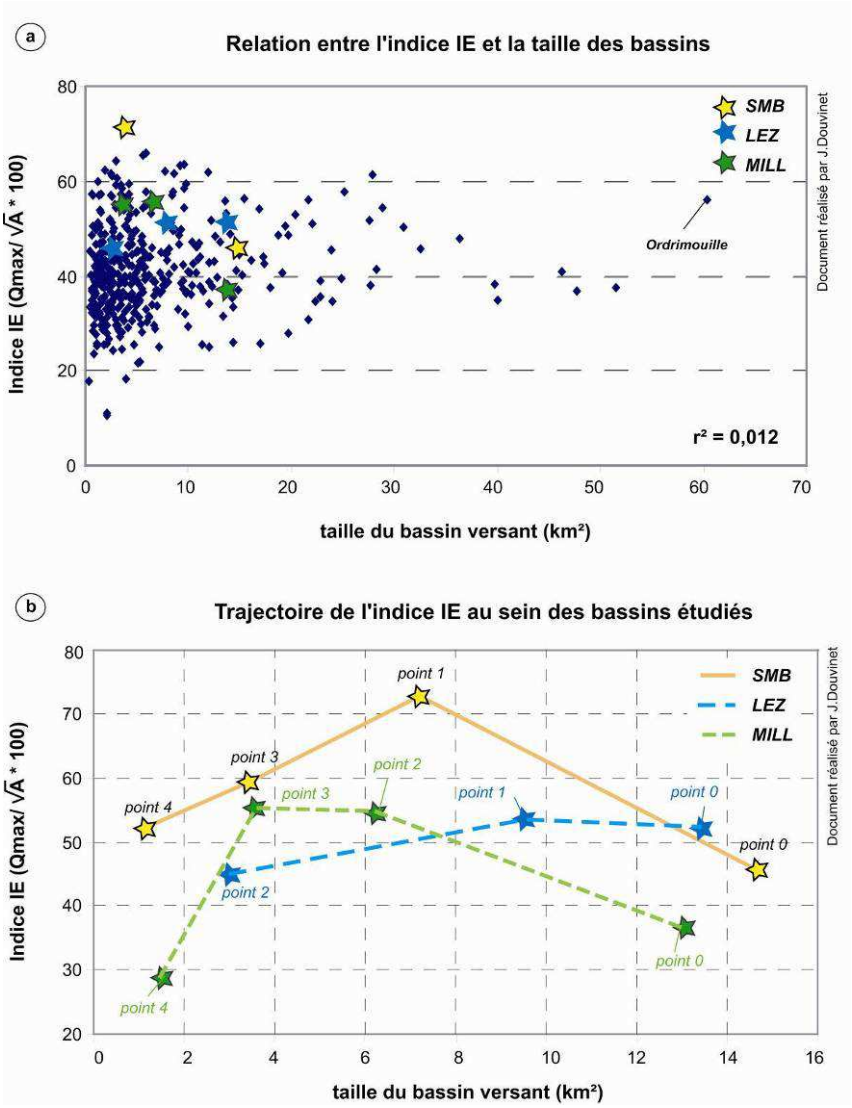


Fig. 9.10. Trajectoire et évolution de l'indice **IE** au sein des bassins versants.

Les cartes identifient des **points de convergence** en amont desquels le réseau est très bien hiérarchisé. **Ce sont des points névralgiques à l'intérieur du bassin où le réseau est efficace vis-à-vis de la forme dans laquelle il s'insère**. D'un point de vue hydrologique, cela signifie que les écoulements peuvent devenir rapides et violents. Ces points « *à forte énergie* » peuvent apparaître au sein de certains bassins versants (en amont de LEZ, par exemple) alors que cette efficacité n'avait pas été détectée à l'échelle globale (fig. 9.11.).

En résumé, la **cartographie des valeurs IE** permet de :
- **visualiser la trajectoire** de cet indice en tout point de l'espace ;
- **traduire la fonctionnalité du réseau** et en comprendre l'efficacité organisationnelle ;
- **faire émerger les confluences en amont desquelles le réseau est bien organisé** ;
- **identifier des points qui n'apparaissent pas comme « *fonctionnels* » à l'échelle globale**.

Ces résultats confirment qu'il est plus important de quantifier l'efficacité structurelle d'un réseau plutôt que de s'attacher à la forme prise par le bassin versant. Par conséquent, la carte de l'indice IE peut être proposée comme **nouvel outil d'analyse de l'inscription d'un réseau au sein d'une forme donnée** (Douvinet *et al.*, 2008a).

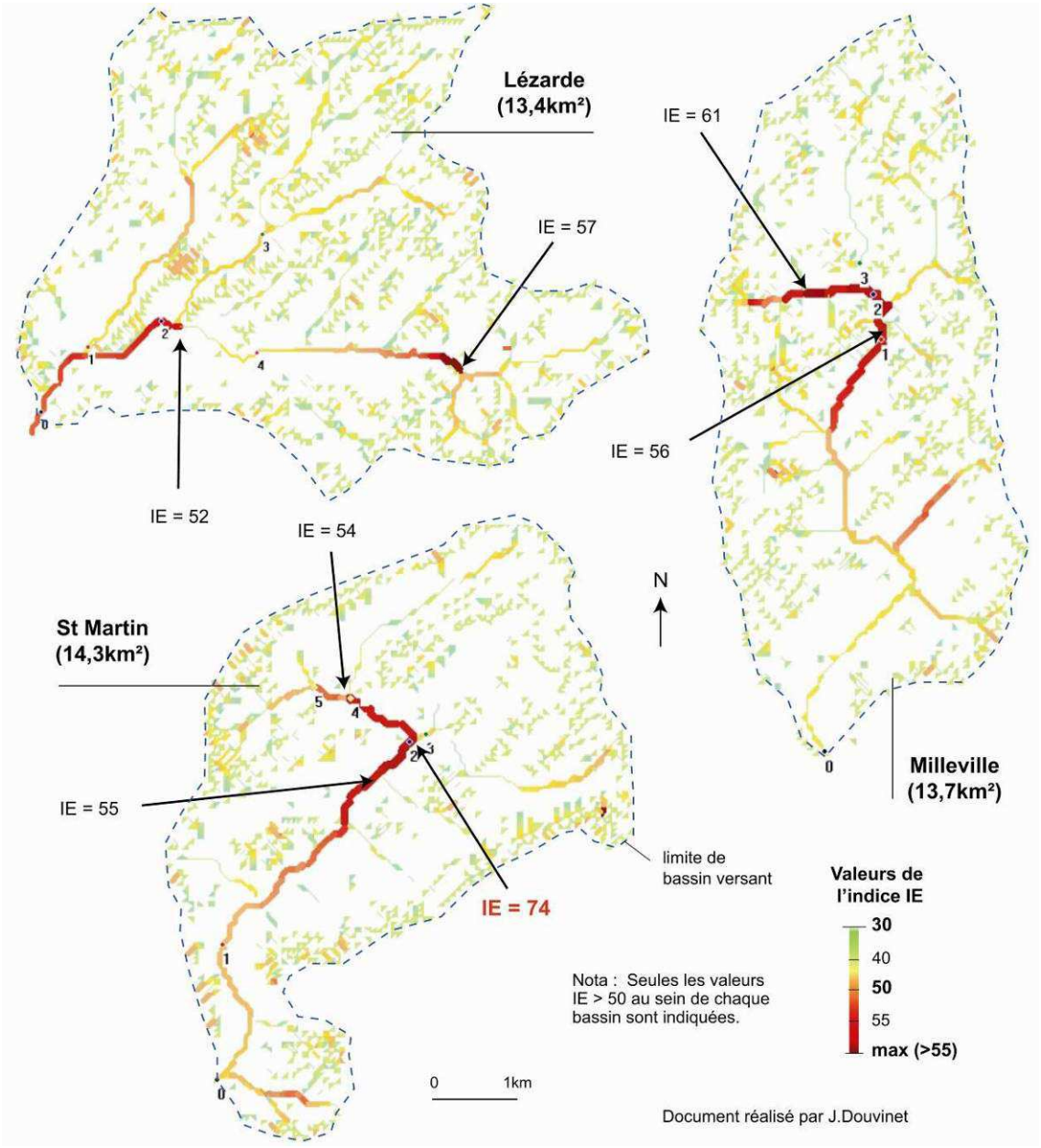


Fig. 9.11. Cartographie de l'indice IE sur les trois bassins étudiés et émergence des cellules en amont desquelles le réseau est structurellement efficace (modifié d'après Douvinet *et al.*, 2008a).

9.2.3. Classification des bassins en fonction de leur efficacité structurelle

On propose désormais de voir l'efficacité structurelle du réseau sur l'ensemble des bassins étudiés. La comparaison entre les bassins où l'indice IE est élevé (ou faible) doit aussi aider à une meilleure connaissance sur l'origine (ou non) de cette efficacité. Dans un premier temps, plusieurs types de **bassins structurellement bien organisés** se distinguent :

- **bassins efficaces uniquement à leur exutoire** (Maresquel, Essômes, Nesles-Pierrecourt, Sélens, Bellefontaine). Les indices sont élevés aux points 0 mais les valeurs sont faibles au sein des bassins (15 entités soit **8,3%**). Dans ce cas-là, le bassin versant a un comportement uniforme et cette échelle reste appropriée pour en mesurer la fonctionnalité (fig. 9.12f.) ;

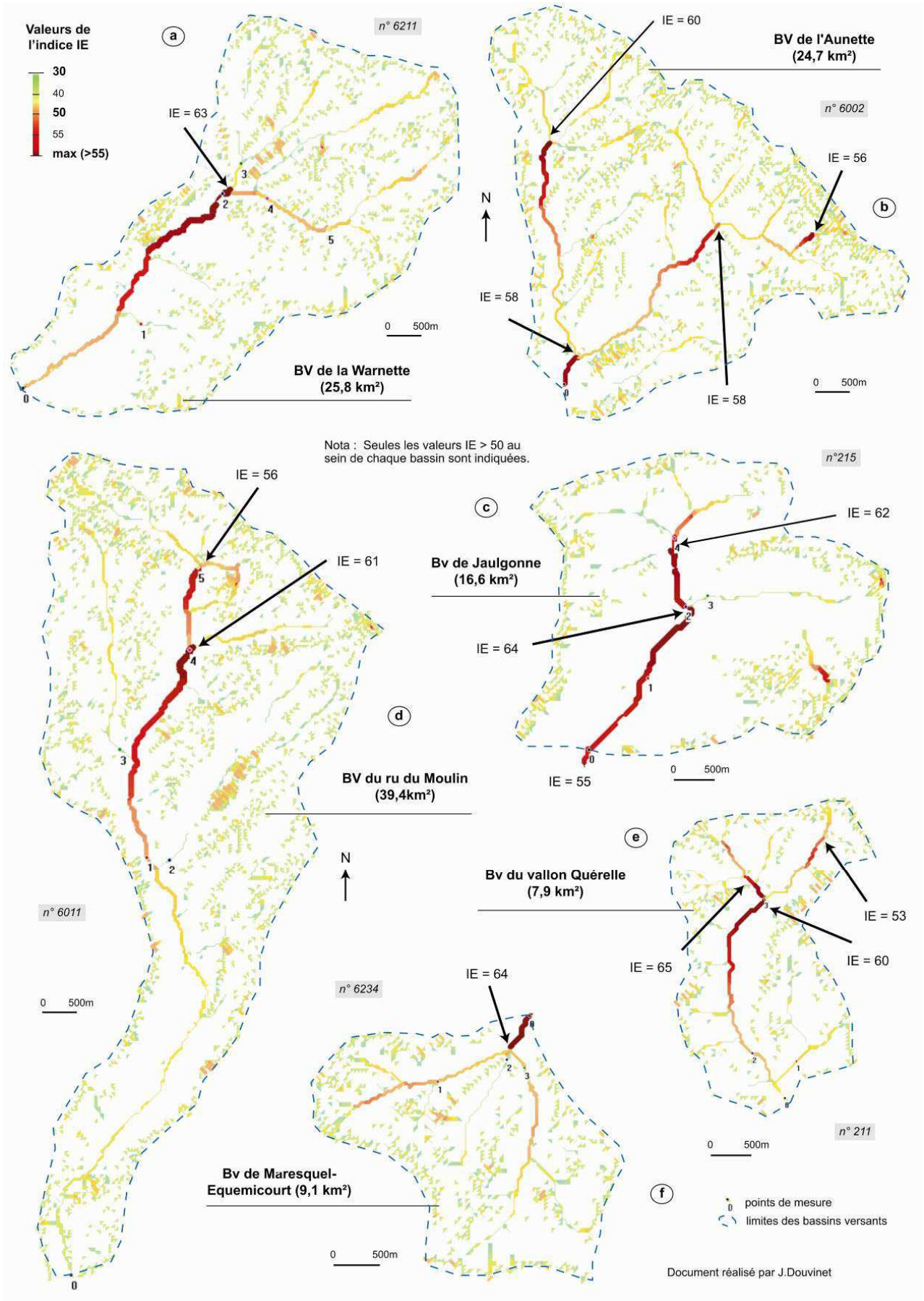


Fig. 9.12. Différentes configurations spatiales où un indice IE supérieur à 50 est détecté.

- bassins présentant une efficacité structurelle interne masquée à l'échelle globale (ru d'Orval, Warnette, vallon Quérelle). 48 bassins sur les 185 étudiés (soit **25,8** %) présentent ce type de configuration. L'échelle globale (« *bassin versant* ») n'est pas du tout adaptée pour étudier la fonctionnalité de ces entités. L'analyse de la réponse hydrologique doit se faire à échelle fine, notamment en se focalisant sur les sous entités les plus fonctionnelles qui correspondent aux surface en amont des points où l'indice IE est élevé (fig. 9.12e.).

- bassins « *hyper efficaces* » à travers les échelles (Jaulgonne, Ordrimouille, ru du Corroy). Ces bassins ont une efficacité interne qui perdure grâce aux différentes contributions des sous entités. Malgré l'augmentation de la taille du bassin, l'indice IE reste élevé (> 55) et le débit maximum de surface continue lui aussi à s'accroître. Ces bassins sont peu nombreux car leurs caractéristiques sont très spécifiques (8 entités sur 185, soit **4,3** %).

- bassins à forte homothétie interne (Haramont, Hargicourt). On recense 9 bassins (**4,7** %) avec ce type de configuration. Si on observe une efficacité à l'échelle globale, on l'observe également à l'échelle intra-bassin. Sur le bassin de l'Aunette (fig. 9.12b), trois confluences avec des indices IE élevés, sont ainsi détectés. L'efficacité structurelle disparaît toutefois entre le local et le global, à cause d'une augmentation rapide de la surface amont.

Un **réseau structurellement bien organisé** présente finalement une **forme particulière**. Pour illustrer ce propos, les réseaux et la bande de cellules à l'origine de Qmax (soit le nombre maximum de cellules situées à équidistance des points où un indice IE est élevé), ont été cartographiés sur différents bassins (fig. 9.13.). L'alignement des cellules prend souvent la forme d'un arc de cercle à équidistance du point de mesure.

Cet effet « *chou-fleur* », comme l'appelle E. Hauchard (2001), se matérialise très clairement. Il traduit un phénomène d'homothétie, avec une dispersion minimale d'énergie qui rappelle les « *systèmes critiques auto-organisés* » de P. Bak (1999). Il est important de noter que certains réseaux, organisés de manière différente, peuvent avoir la même efficacité sur des surfaces de taille variable. L'effet « *chou-fleur* », qui se reproduit à travers les échelles, est donc **fractal**.

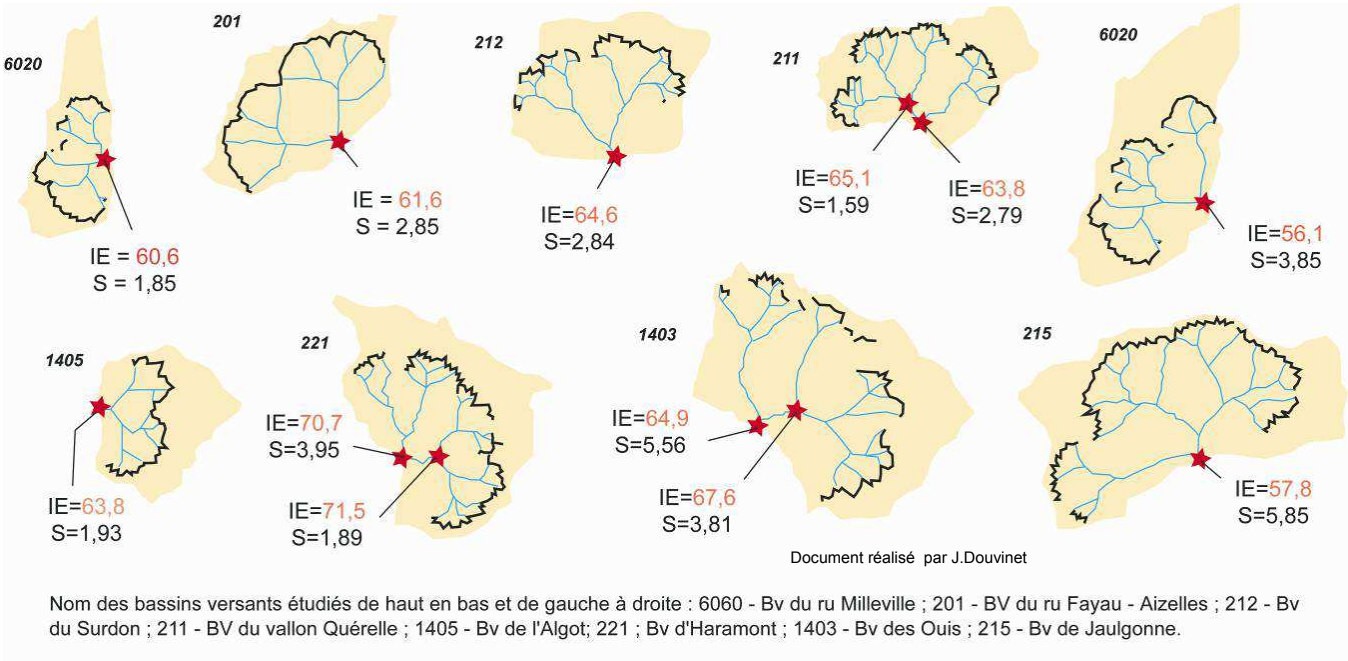


Fig. 9.13. Effet « *chou-fleur* » à l'origine d'une structuration du réseau efficace.

Au final, les bassins structurellement bien organisés représentent **43,8 % de l'échantillon**. La répartition entre les différents départements (tab. 9.2.) montre :

- une **dispersion** des bassins homothétiques et des bassins efficaces à travers les échelles ;
- une plus forte **sensibilité** pour le Pas-de-Calais, l'Aisne, la Seine-Maritime et l'Oise pour les bassins efficaces dans leur partie aval et/ou dans leur partie interne. Ces départements regroupent 87 % des bassins efficaces, dont 34 % uniquement pour la Seine-Maritime.

Numéros des départements	02	14	27	59	60	62	76	80	total
Bassins présentant une forte homothétie interne	1	0	1	0	2	2	3	0	9
Bassins efficaces uniquement à leur exutoire	4	0	0	0	3	5	4	0	16
Bassins présentant une efficacité structurelle interne	7	1	2	1	9	10	14	4	48
Bassins efficaces à travers les échelles spatiales	3	1	0	0	0	1	3	0	8
Nombre total de bassins efficaces par département	15	2	3	1	14	18	24	4	81
Autres bassins ne présentant pas d'indices IE > 50	21	5	13	4	13	18	12	6	104
Nombre total de bassins étudiés (nombre de bassins manquants)	36 (-1)	7 (0)	16 (0)	5 (0)	27 (-1)	36 (-1)	36 (-1)	10 (0)	185 (-4)

Tab. 9.2. Répartition des différents bassins suivant leur efficacité structurelle.

Dans un second temps, les bassins où l'indice IE est faible, ont été étudiés. Le pourcentage de terres cultivées, pouvant compenser une certaine « *inefficacité* » structurelle, n'est pas plus élevé sur ces bassins (Annexe 9.2.). Leur **inefficacité** s'explique pour des raisons multiples et combinées sur ces bassins qui représentent 56,2 % de l'échantillon :

- des bassins **filiformes** où un seul drain circule au sein d'une forme allongée (fig. 9.14a.) ;
- une **dissymétrie** des réseaux qui entraîne une réaction lente et étalée (fig. 9.14b.) ;
- une absence de hiérarchisation entre les réseaux, notamment dans les parties amont, ce qui explique une dispersion d'énergie maximale entre les drains (fig. 9.14b. et 9.14e.) ;
- des contributions déconnectées des sous bassins versants qui forment un surfaçogramme plus étalé (Delahaye, 2002 ; Douvinet, 2004 ; fig. 9.14b.) ;

Une dernière étude tente d'associer ces résultats aux deux portraits types morphologiques (tab. 9.3.) précédemment définis dans le chapitre 5 (§ 5.2.).

Type de bassins	Type 1.1.	Type 1.2	Type 2	total
Bassins présentant une forte homothétie interne	**6**	2	1	9
Bassins efficaces uniquement à leur exutoire	**11**	4	1	16
Bassins présentant une efficacité structurelle interne	**31**	**11**	**6**	**48**
Bassins efficaces à travers les échelles spatiales	**6**	1	1	8
Nombre total de bassins efficaces (pourcentage)	**54** (43,2 %)	**18** (36 %)	**9** (90 %)	**81**
Nombre total de bassins versants étudiés	**125**	**50**	**10**	**185**

Tab. 9.3. Répartition des types de bassins en fonction de leur efficacité structurelle.

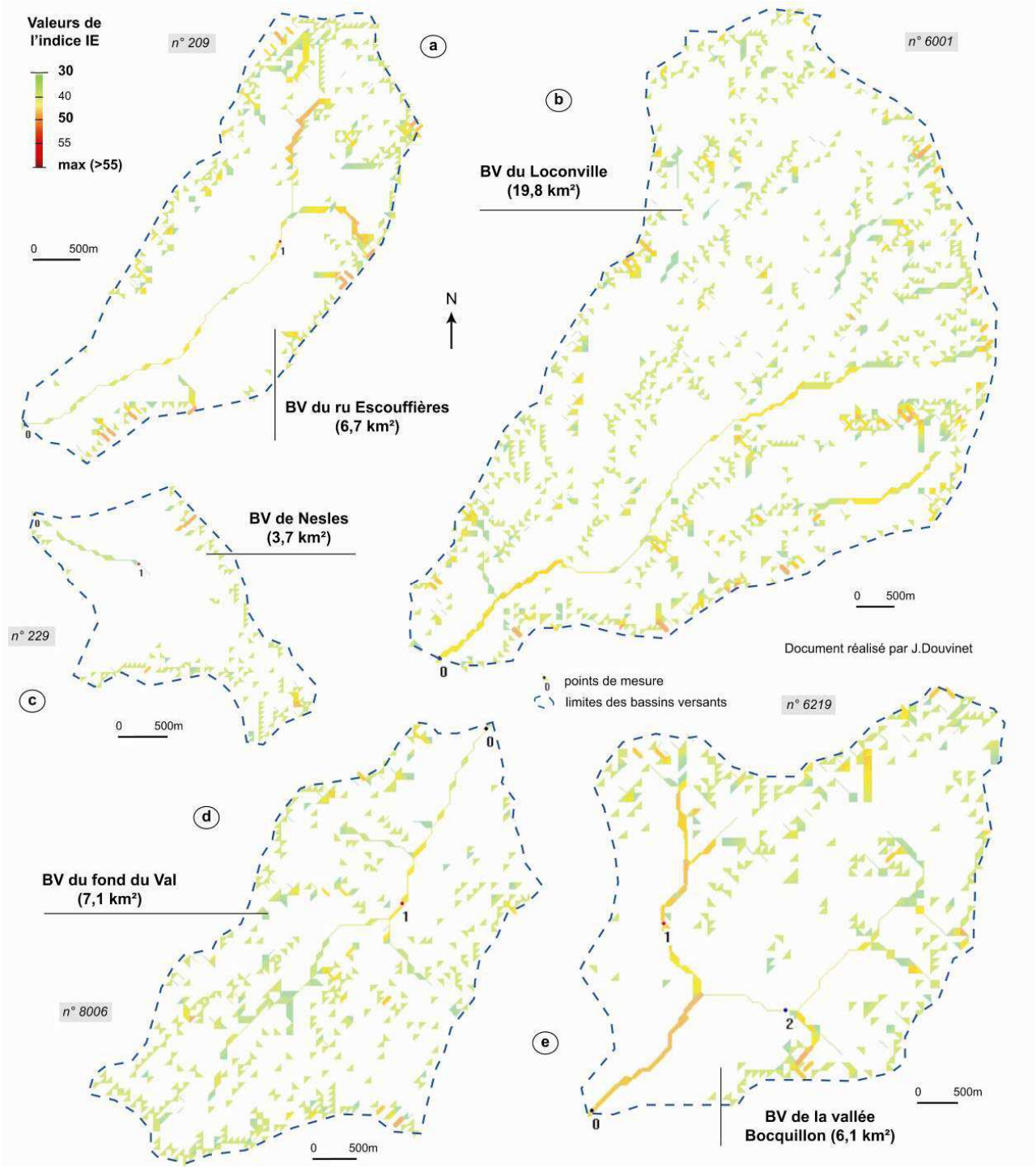


Fig. 9.14. Différentes configurations spatiales où un indice IE supérieur à 50 est détecté.

La comparaison avec les **trois types** de bassins sensibles montre que les bassins ayant une structuration interne efficace prédominent dans les trois types (fig. 9.15. ; tab. 9.3.) :

- 54 bassins du sous-type 1.1 sont efficaces (soit 43 %) ;
- 18 bassins du sous-type 1.2 sont également efficaces (soit 36 %) ;
- 9 bassins du type 2, soit 90 %, présentent une efficacité marquée. **Alors que ces bassins avaient été distingués par des critères purement morphométriques, et par leur position en amont des grands bassins versants, on confirme ici leur efficacité fonctionnelle.**
- **les bassins homothétiques sont observés indépendamment de la taille de bassins** ;

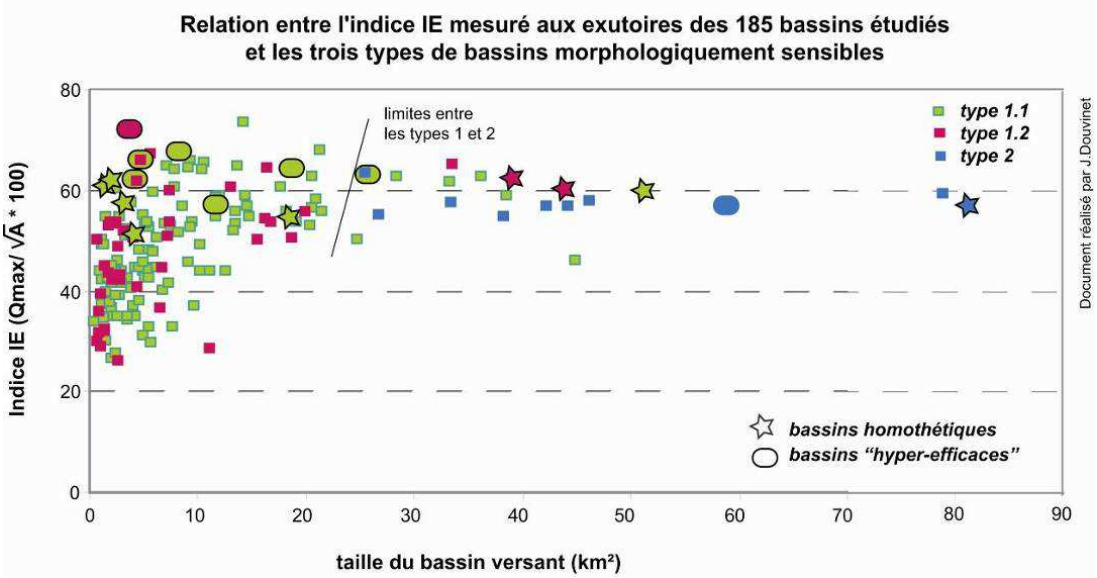


Fig. 9.15. Différentes configurations spatiales où un indice IE supérieur à 50 est détecté.

Cette section permet donc de mieux comprendre le rôle de la **structuration du réseau** sur l'efficacité hydrologique potentielle d'un bassin versant. On peut maintenant étudier l'effet accélérateur ou réducteur des pentes sur le transit des écoulements de surface.

9.3. Influence des pentes sur le système morphologique

9.3.1. Des réponses lissées et plus étalées dans le temps

En intégrant la pente locale tout au long du transit de la surface affectée aux cellules, la simulation s'approche un peu plus de la réalité du phénomène (Annexe 8.2.). Les graphiques (des « *morphogrammes* ») indiquent le cumul des surfaces passées toutes les minutes au point de mesure (fig. 9.16.). La forme d'un bassin, ses pentes et son réseau hydrographique étant combinés, on peut désormais évaluer l'**efficacité du système morphologique** à travers une vision synthétique. Après une analyse en plan, on mesure aussi l'incidence de l'encaissement sur le fonctionnement hydrologique potentiel des bassins versants.

De manière générale, l'introduction de la pente ne gomme pas les effets de forme d'un bassin ni l'influence de l'architecture du réseau. Pour illustrer ce propos, les quatre bassins choisis lors de la première étude sont de nouveau étudiés. Les morphogrammes gardent des allures proches des surfaçogrammes, en particulier pour les bassins AIZ et ESS (fig. 9.16.).

Des « *anomalies* » apparaissent très rapidement. L'effet des pentes se matérialise par un lissage des courbes qui ont des formes plus étalées. Les pics des morphogrammes obtenus aux exutoires des bassins et sous bassins principaux (tab. 9.4.) montrent des débits de surface plus faibles que ceux mesurés lors du **processus itératif**. Plus les valeurs diminuent, plus les pentes ont tendance à réguler la réponse des bassins. En condition de pente semblable, cette dernière atténue finalement l'effet de forme et uniformise la réponse hydrologique.

Noms des bassins versants	Surface (km²)	**A** – Qmax (ha) morphogramme	**B** – Qmax (ha) surfaçogramme	Ecarts : (**B – A) / B** (%)
Essômes sur Marne [ESS] – point 0	21,32	16,69	25,06	33,4 %
Essômes sur Marne [ESS] – point 2	9,81	9,53	13,03	28,8 %
Lézarde amont [LEZ] – point 0	13,41	7,03	18,16	61,2 %
Lézarde amont [LEZ] – point 2	9,29	6,90	16,59	58,4 %
Lézarde amont [LEZ] – point 3	3,29	3,82	8,17	53,2 %
Saint Martin de Boscherville [SMB]	14,30	7,81	16,82	53,5 %
Saint Martin de Boscherville – point 1	7,75	10,44	16,82	37,9 %
Saint Martin de Boscherville – point 4	3,71	6,84	10,88	37,1 %
Aizelles [AIZ] – point 0	4,11	7,70	10,58	27,2 %

(Qmax : débit maximum de surface (en hectares) lors de la simulation ; Dv : Temps de concentration ou nombre de minutes pour vidanger le bassin ; Indice IP = Qmax / (S/100).

Tab. 9.4. Valeurs obtenues pour les simulations 3D sur les 4 bassins versants.

Sur AIZ, la différence est la plus faible (- 27 %) grâce à la petite taille et aux pentes fortes qui sont présentes dans la partie intermédiaire du bassin. Sur ESS, si l'allure générale reste la même, les deux sous bassins présentent des différences notoires (fig. 9.15b.). Le pic estimé à l'exutoire du bassin en amont du point 1 (9,53 ha) est plus élevé que celui mesuré au point 2 (8,15 ha), alors que sa surface est plus grande. Sur LEZ, l'efficacité de l'homothétie interne est fortement amoindrie puisque le pic du morphogramme chute de 61% à l'exutoire. **Les pentes faibles allongent la durée de transit des surfaces au sein du bassin versant** (fig. 9.16c.).

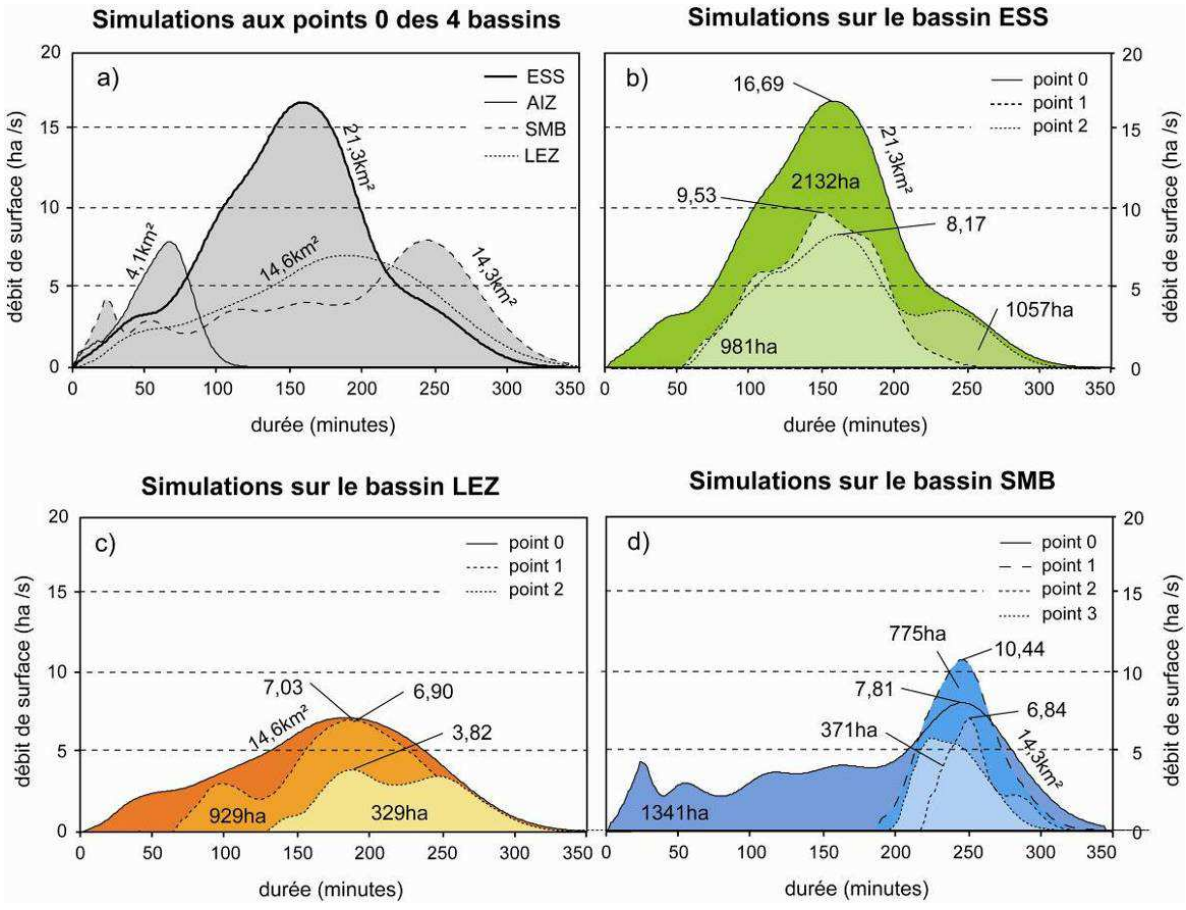


Fig. 9.16. *Morphogrammes* des quatre bassins et contributions des différents sous bassins.

Sur SMB, la forme dissymétrique, à montée lente et chute rapide du morphogramme, est conservée. L'apport des drains latéraux situés dans la partie aval, puis la contribution de la zone amont, plus efficace, est bien visible (fig. 9.16d.). Cette efficacité, diminuée sous l'effet des pentes (- 37 %), est encore plus réduite à l'échelle globale du bassin versant à cause des pentes faibles qui dominent dans le fond du vallon principal de la partie aval (- 53%). Le pic de débit de surface passe de 10,44 ha au point 1, à 7,44 ha à l'exutoire final (tab. 9.4.). Ces résultats, fortement dépendants de la vitesse d'écoulement, sont à relativiser car l'équation, classiquement utilisée en hydrologie, n'a pas été validée par des mesures terrain *in situ*.

9.3.2. Effets de pente associés aux effets de forme et de réseau

Les comportements hydrologiques des bassins deviennent très différents. **Les bassins du type 2 (la Lézarde par exemple), situés en amont de plus grands bassins, conservent une réactivité importante conférée par leur efficacité structurelle.** En revanche, les écarts en terme de débits de pointe se réduisent avec des vallons du **type 1** où la pente est bien plus prononcée. Certains bassins, présentant un réseau dissymétrique ou peu hiérarchisé (le ru du Coulant, le ru de Callenville, fig. 9.18), compensent leur « *inefficacité* » structurelle par un encaissement rapide qui accélère le transit des écoulements de surfaces. Les bassins les plus encaissés sont les plus réactifs : le débit de pointe (7,70 ha) mesuré à l'exutoire du bassin d'Aizelles (4,7 km²), est plus élevé que celui de la Lézarde (7,03 ha), alors que ce dernier a une taille trois fois supérieure (14,3 km² ; fig. 9.17.).

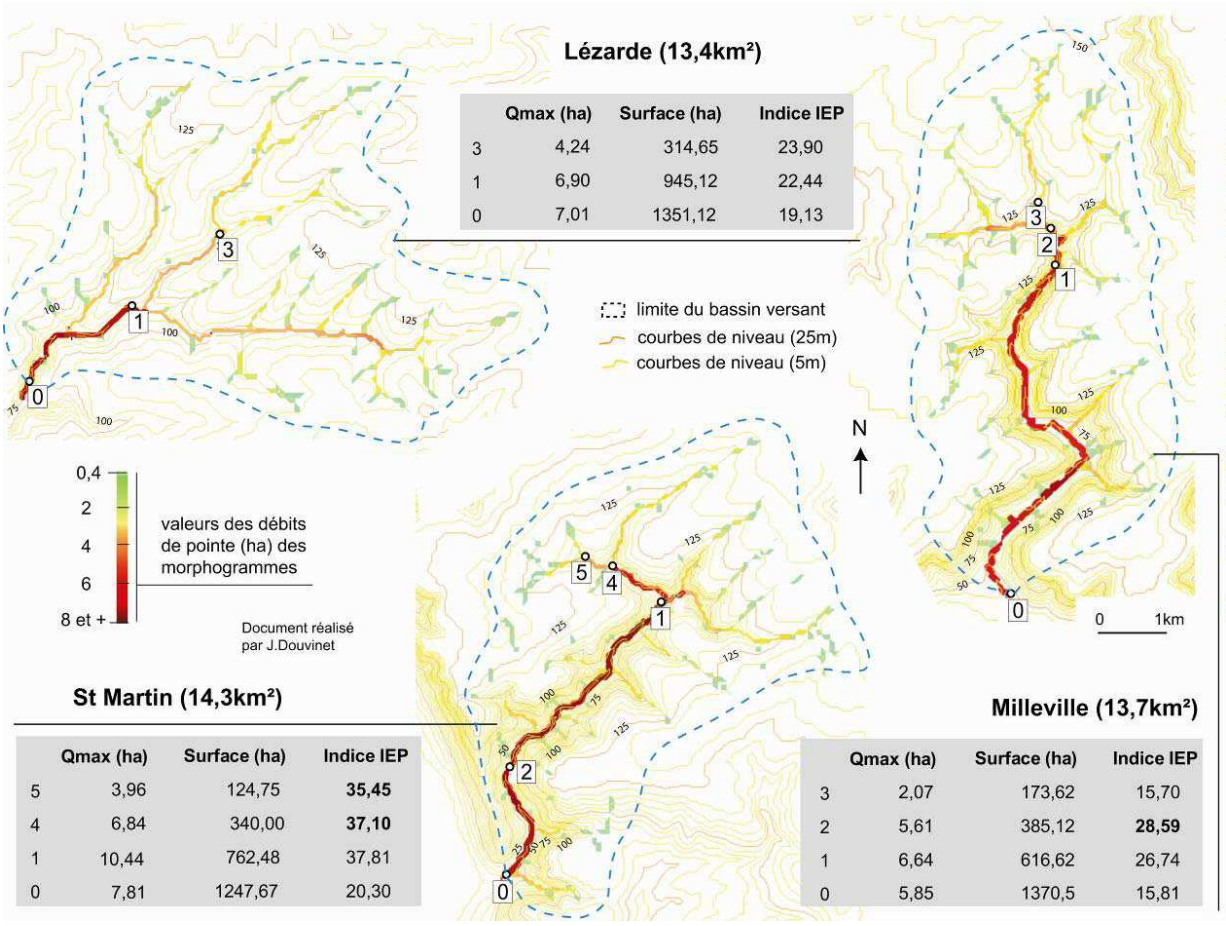


Fig. 9.17. Cartographie des débits de surfaces passées dans chaque cellule sur trois bassins.

Les bassins qui associent un **encaissement** rapide et une **structuration** du réseau **efficace** sont potentiellement les plus dangereux. On peut à nouveau prendre l'exemple du bassin de St-Martin, qui présente une partie amont bien structurée et des pentes qui sont rapidement plus élevées. Le débit de pointe (10,44 ha) mesuré au point 1 est élevé par rapport à la taille du bassin versant (7,62 km² ; fig. 9.17.). La partie aval réduit considérablement le transit des surfaces, abaissant le débit de pointe (7,81 ha) de manière importante (- 25 % ; fig. 9.18d.).

Afin de **visualiser les effets de pente** par rapport aux effets de forme et de réseau, les pics des morphogrammes ont été replacés sur les profils en long de certains vallons. Les valeurs surlignées en jaune indiquent les valeurs des débits de pointe mesurés aux exutoires finaux. Le bassin du Callenville, certes encaissé, est peu réactif car le bassin est allongé et drainé par un seul cours d'eau finalement longiligne (fig. 9.18a.). Le bassins du ru Quérelle (fig. 9.18c.) présente, dans sa partie amont, une efficacité interne associée à des pentes fortes, mais la partie aval, moins pentue et plus allongée, fait également chuter (- 29 %) les débits de pointe (fig. 9.19.). **L'efficacité interne du ru du Coulant s'associe à un encaissement progressif qui est faiblement amoindrie en arrivant à l'exutoire** (fig. 9.18b.).

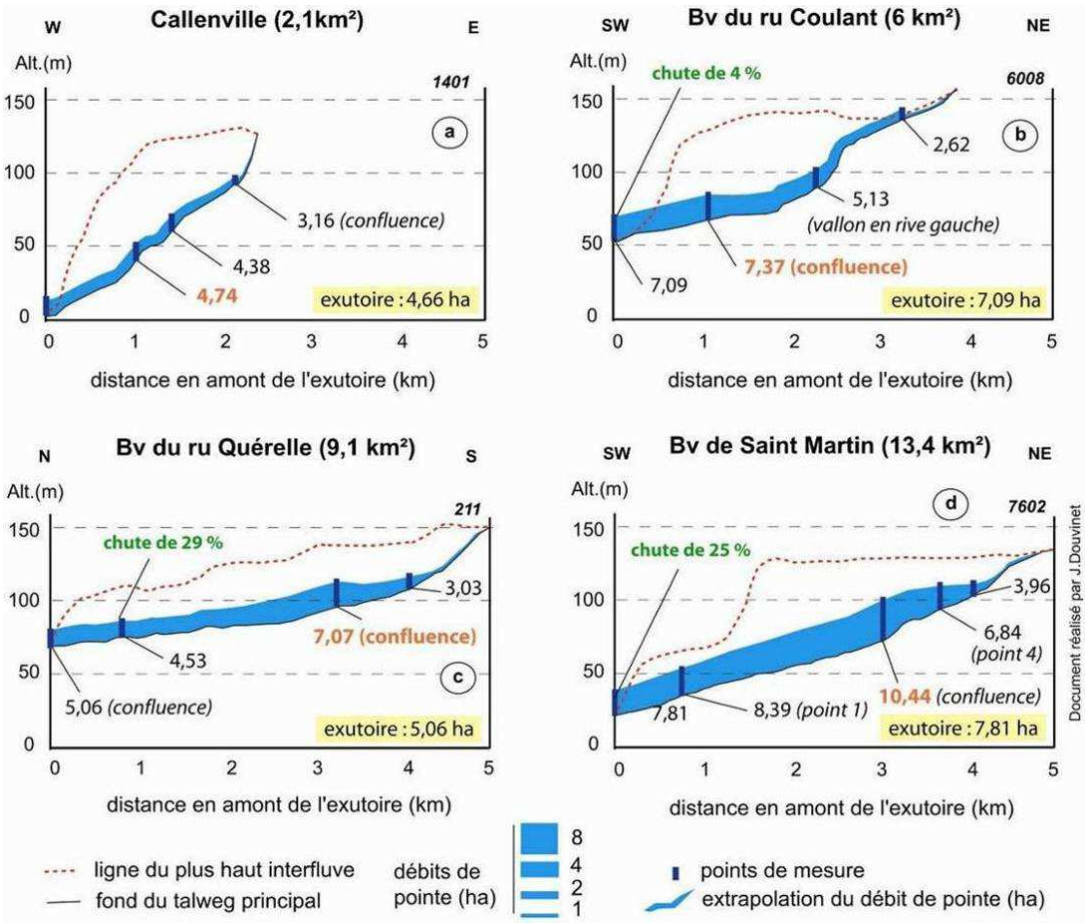


Fig. 9.18. Profils en long et pics des *morphogrammes* simulés sur différents bassins du type 1.

Les signatures morphologiques tendent finalement à **se diversifier** suivant la **position des bassins** (partie amont / partie la plus en aval possible de grands bassins), leur encaissement, et la **structuration interne de leur réseau**. L'extrême diversité des réactivités observées sur les différents bassins (type 1 ou 2) est à associer à la **pluralité des configurations internes**.

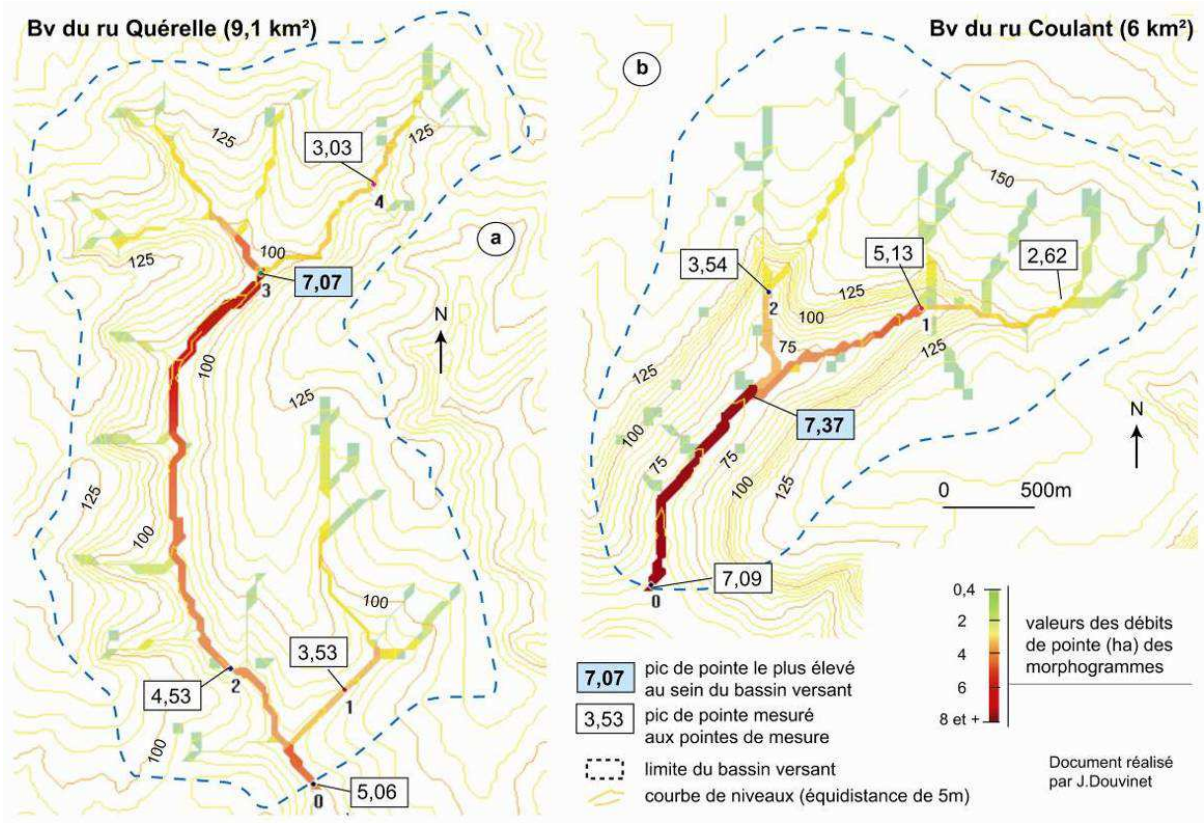


Fig. 9.19. Cartographies des pics des *morphogrammes* et courbes de niveau sur deux bassins.

9.3.3. Quantifier l'efficacité du système morphologique avec un indice IEP

Un dernier indice, l'indice **IEP** (Indice d'Efficacité des Pentes) est proposé, en comparant les pics des morphogrammes (Qmax) et la surface (A) en amont de chaque point de mesure :

$$IEP = \frac{Q_{max}}{\sqrt{A}} \times 100$$

Cet indice est l'équivalent de l'indice IE mais on intègre ici les effets de pente puisqu'on rapporte le pic du morphogramme, et non celui du surfaçogramme. Les valeurs élevées (>40) indiquent une efficacité marquée **du système morphologique**. La partie en amont du bassin SMB est très clairement mise à jour, avec un indice **IP** de 35,4 en amont du point 5 (fig. 9.17.), puis 37,1 en amont du point 1. La valeur chute très rapidement vers l'aval, où la valeur est de 20,3. La trajectoire de l'indice IEP (fig. 9.20.) est proche de l'indice IP (fig. 9.10.). Si le bassin de Milleville présente une efficacité structurelle relativement similaire, les valeurs de l'indice IEP sont plus faibles car les pentes sont bien moins prononcées en amont (fig. 9.17.).

D'autres configurations présentent également une réactivité importante (fig. 9.20.). Les débits de pointe des morphogrammes sont élevés sur les **bassins homothétiques encaissés** (Jaulgonne), sur des bassins « *hyper-efficaces* » (Ordrimouille) ou sur des bassins à forte pente et efficaces uniquement à leur exutoire (Essômes) **car ils associent une efficacité structurelle et un encaissement marqué**. **Par opposition, les bassins homothétiques faiblement pentus (Lézarde) ont des indices IEP nettement plus faibles** (fig. 9.20.).

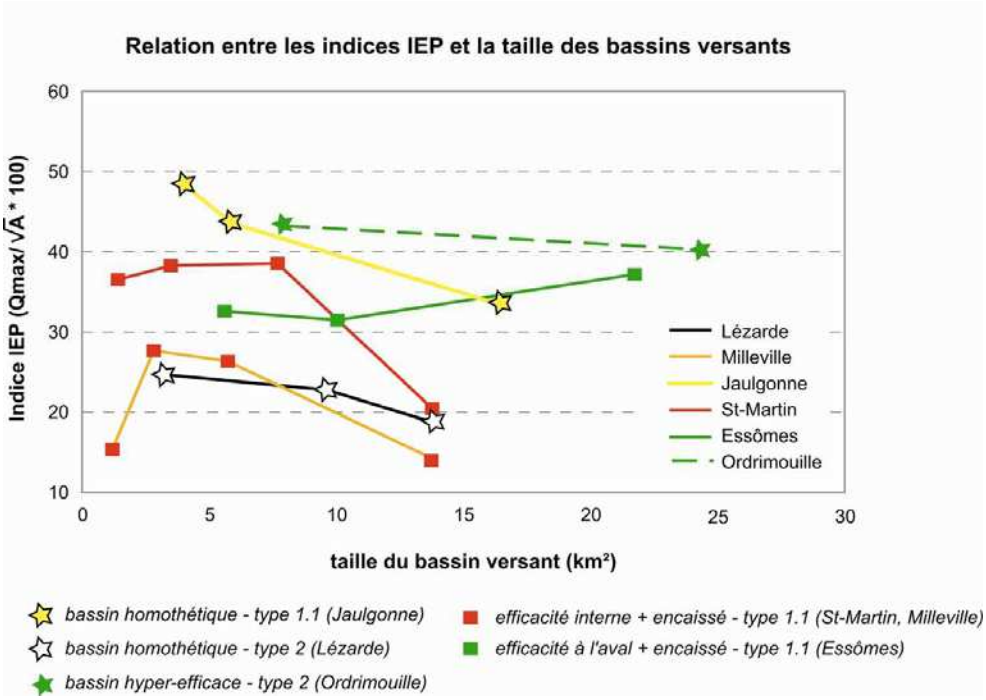


Fig. 9.20. Opposition entre différents types de comportement en fonction de l'indice IEP.

Tous ces résultats mettent à nouveau en cause la notion d'homogénéité hydrologique du « *bassin versant* ». Il faut faire attention à l'échelle à laquelle on se place pour mesurer l'efficacité du système morphologique d'un bassin. Sur les bassins LEZ et SMB, de taille identique, les indices mesurés aux deux exutoires sont proches (~ 20). **La construction de la réponse hydrologique n'est pourtant pas la même au sein de ces deux entités** (fig. 9.20.). Le bassin SMB est efficace dans sa partie interne, puis pâtit d'une partie aval inefficace ; sur le bassin LEZ, l'homothétie maintient une influence structurelle constante mais les effets de pente restent limités. **A moyen terme, une cartographie des indices IEP est envisagée pour quantifier la réactivité du système morphologique en tout point de l'espace.**

Conclusions du chapitre 9

Les simulations obtenues à partir de *RuiCells* permettent d'améliorer les connaissances sur l'influence des **interactions entre les variables morphologiques** sur la réponse hydrologique d'un bassin versant. Il est également possible de mieux comprendre les jeux d'échelles jouant sur la **construction spatiale du débit de surface**. On peut alors répondre aux trois questions posées en introduction :

► Quelle est la dynamique induite par les interrelations entre les différentes composantes morphologiques (forme, réseau, pente) ?

Les **signatures surfaciques** permettent d'appréhender les **effets de forme et de réseau** au sein des différents bassins. Plus que la taille des bassins, ce sont finalement les **connexions entre les surfaces et le réseau**, et **la distance des sous bassins par rapport à l'exutoire**, qui conditionnent l'efficacité de la réponse hydrologique des bassins. Les **effets de pente** jouent

aussi un rôle en diminuant, en compensant ou en aggravant, les effets des deux composantes précédentes. Les signatures morphologiques sont finalement diversifiées entre les bassins, ce qui traduit la pluralité des configurations internes. **Cette approche, dynamique et continue en tout point de l'espace, permet de mieux appréhender la place de chaque variable tout en mesurant l'efficacité du système morphologique dans sa globalité.**

► Peut-on quantifier l'efficacité des différentes structures et traquer des « *anomalies* » susceptibles de déterminer des comportements originaux (homothétie, compacité) ?

A l'inverse des indices traditionnels, qui recherchent la « *normalité* » de l'organisation des formes, l'utilisation de l'automate permet de **traquer toutes les «*anomalies morphologiques*» réellement explicatives de comportements hydrologiques originaux** (Delahaye *et al.*, 2007). **81 bassins sont structurellement bien organisés sur les 189 bassins touchés par des « *crues rapides* »** (1983-2005), ce qui représente 43 % de l'échantillon. Certains bassins présentent une efficacité interne (48 bassins), d'autres sont uniquement efficaces à leur exutoire (16 bassins), homothétiques (9 bassins) ou « *hyper efficaces* » (8 bassins).

9 bassins du type 2 (soit **90 % de l'échantillon**), qui avaient été distingués dans le chapitre 5 par des critères purement morphométriques, présentent une efficacité structurelle. Il faut ensuite intégrer les effets de pente qui modifient fortement les signatures morphologiques de ces bassins. **Les bassins qui associent une efficacité structurelle et un encaissement marqué sont potentiellement les plus dangereux.**

► L'échelle du « *bassin versant* » est-elle pertinente pour mesurer cette efficacité ? Si non, quel est le niveau d'observation le plus approprié ?

L'échelle globale du bassin versant peut masquer l'efficacité structurelle de certaines sous unités. Elle peut également dissimuler l'influence du système de pentes qui peut amoindrir l'efficacité structurelle interne, ou compenser, au contraire, une certaine inefficacité sur les bassins encaissés qui ne présentent pas d'indices IE élevés.

L'entité *bassin versant* ne doit donc pas être considérée comme ayant un fonctionnement hydrologique homogène, mais simplement comme l'aire drainée par un exutoire. Sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville, la réponse globale ne traduit pas le comportement de la partie amont. Il faut privilégier une étude à l'échelle des « *zones morphologiques fonctionnelles* », définies comme les surfaces en amont des confluences où les indices IE et/ou IEP sont élevés.

Synthèse de la troisième partie

Après une critique des indices classiques, issus de différentes approches statiques, **cette recherche propose d'étudier l'influence du système morphologique à travers une méthode plus dynamique et plus synthétique, en faisant appel à de nouvelles méthodes d'analyse spatiale issues de la théorie de la complexité.**

► De la morphométrie aux systèmes complexes

L'état des connaissances sur les indices morphométriques a permis de mettre à jour une typologie en fonction des composantes morphologiques étudiées. Néanmoins, chaque indice, s'il est étudié indépendamment des autres, ne suffit pas à traduire le système morphologique perçu ici comme la combinaison spatiale entre la forme du bassin, son réseau et son système de pentes. On peut finalement définir les longueurs des biefs, leur ordre, leur diffusion dans l'espace, etc., mais leur dynamique potentielle reste difficile à estimer.

Il est apparu intéressant de développer un outil permettant de **traduire**, de manière plus dynamique et plus synthétique, **l'organisation des bassins versant**s. Dans cette optique, une méthode basée sur l'utilisation d'un automate cellulaire est rapidement devenue pertinente. **Les interactions entre les effets de formes, de pentes et de réseaux sont progressivement évaluées à travers différentes simulations, dans un espace à deux puis à trois dimensions.**

► L'automate cellulaire *RuiCells* comme outil d'investigation morphométrique

Les simulations montrent que l'automate cellulaire *RuiCells* peut constituer un bon outil d'investigation géomorphologique. A l'inverse des méthodes classiques qui recherchent la « *normalité* » de l'organisation des formes (homothétie), **l'automate permet de traquer toutes les « *anomalies morphologiques*»** réellement explicatives du comportement hydrologique.

On peut mesurer la dynamique des interactions entre les composantes d'un bassin (forme, pentes, réseaux), **de manière séparée puis agrégée**. **Le caractère dynamique de l'approche proposée permet surtout de mieux comprendre comment s'élabore, dans le temps et dans l'espace, la construction spatiale de la réponse hydrologique.**

Les simulations apportent des résultats importants. **81 bassins** sont structurellement bien organisés sur les 185 bassins étudiés (43 % de l'échantillon). **9 bassins du type 2** (soit 90 % de l'échantillon) présentent une structuration efficace du réseau de talwegs. La fonctionnalité de ces entités spatiales, distinguées par des critères purement morphométriques, est mise à jour par l'automate. L'homothétie est, en revanche, observée sur n'importe quelle taille de bassin.

Jusqu'à présent, l'analyse de la réponse hydrologique d'un bassin pouvait être abordée indirectement par l'étude des débits, qui ne pouvait se faire qu'à l'échelle de grands bassins versants, afin de disposer d'un réseau de mesure conséquent. L'approche proposée ici, se basant sur des simulations numériques réalisées à partir des caractéristiques physiques du bassin, offre la possibilité d'étendre cette méthode à des cours d'eau non jaugés.

Les simulations proposées à partir de l'automate cellulaire montrent finalement comment les sous unités fonctionnelles d'un bassin se combinent ou, au contraire, se dissocient suivant l'architecture des réseaux de concentration. Ce sont les interrelations entre les niveaux locaux qui expliquent la complexité de la réponse hydrologique globale d'un bassin. Ce constat est important car il amène à reconsidérer l'unité hydrologique nommé *« bassin versant »*.

► Remise en cause de l'homogénéité hydrologique du « *bassin versant* »

La notion de « *bassin versant* » a toujours été considérée en hydrologie comme l'unité fonctionnelle de référence. Néanmoins, l'aire drainée par un exutoire donné n'a pas un fonctionnement homogène. Elle peut également dissimuler des sous unités fonctionnelles internes. La réponse hydrologique peut ainsi être conditionnée par le fonctionnement d'une partie interne, le reste de la surface ne constituant qu'un corps d'accompagnement (comme sur St Martin par exemple).

La notion classique de *« bassin versant »* est finalement valide pour effectuer des bilans hydrologiques annuels ou mensuels En revanche, pour des pas de temps plus courts ou pour des phénomènes hydrologiques violents, rapides et très localisés, il est plus pertinent de **mettre l'accent sur les zones réactives du bassin. Le but recherché est alors de détecter tout phénomène d'émergence qui est produit depuis l'échelle locale.**

Partie IV

Vers une cartographie des « *espaces sensibles* »

Introduction de la quatrième partie **p. 267**

Chapitre 10 – Vers une meilleure prise en compte des interactions spatiales dans le fonctionnement des hydrosystèmes **p. 269**

Chapitre 11 – Spatialisation des zones « *à risque* » à différentes échelles : essai de cartographie **p. 293**

Synthèse de la quatrième partie **p. 309**

Trouville (14) – 1er juin 2003
Source : S. Legeai (Ouest-France)

Introduction de la quatrième partie

L'objectif de la quatrième partie est de souligner les liens qui existent entre **l'organisation morphologique des bassins versants et les variables physiques et humaines** qui composent le système spatial complexe nommé « *bassin versant* ». Ce travail doit permettre de contribuer à une meilleure connaissance des **« *espaces sensibles* »** aux « *crues rapides* » dans les régions de plateaux du nord de la France.

Une **approche plus synthétique** est, tout d'abord, proposée en implémentant les autres variables (pluies, occupation du sol) dans les simulations. Classiquement, l'approche par les SIG (Système d'Information Géographique) a été privilégiée pour croiser différentes couches d'informations (King *et al*., 1991 ; Lardon, 1992). Néanmoins, si cette approche tient compte des relations verticales, elle néglige les relations horizontales qui existent entre les objets. En faisant interagir l'ensemble, dans un système hiérarchique ensembliste (cf. chapitre 8), on souhaite produire de nouveaux phénomènes d'émergence, et mettre en évidence les **effets des interactions spatiales associées au contrôle morphologique**. **Ce travail s'inscrit dans une démarche d'expérimentation, et non de modélisation.**

Par ailleurs, en confrontant la localisation des espaces bâtis avec la dynamique potentielle d'un bassin versant, on souhaite voir si on peut localiser des espaces potentiellement exposés à des « *crues rapides* ». Aucune étude n'a été proposée, jusqu'à présent, pour spatialiser les secteurs géographiques pouvant être touchés par ce type d'aléa. Les études hydrologiques menées dans ces régions se sont toujours focalisées sur les inondations par débordement, par remontées de nappe (Topin, 2000 ; Laganier, 2002 ; Garry *et al*., 2002 ; Agasse, 2005) ou sur les crues turbides hivernales (Le Bissonnais *et al*., 2002). Cette démarche est aussi expérimentale car la morphologie et les surfaces bâties sont les deux seules composantes corrélées.

Cette partie s'organise de manière à répondre aux deux questions suivantes :
- quel sont les effets des autres composantes du système bassin versant (occupation du sol, pluie) en lien avec l'influence de l'organisation morphologique (**chapitre 10**) ?
- existe-t-il un lien entre les zones sinistrées et la réactivité des bassins (**chapitre 11**) ?

Chapitre 10

Vers une meilleure prise en compte des interactions spatiales dans le fonctionnement des hydrosystèmes

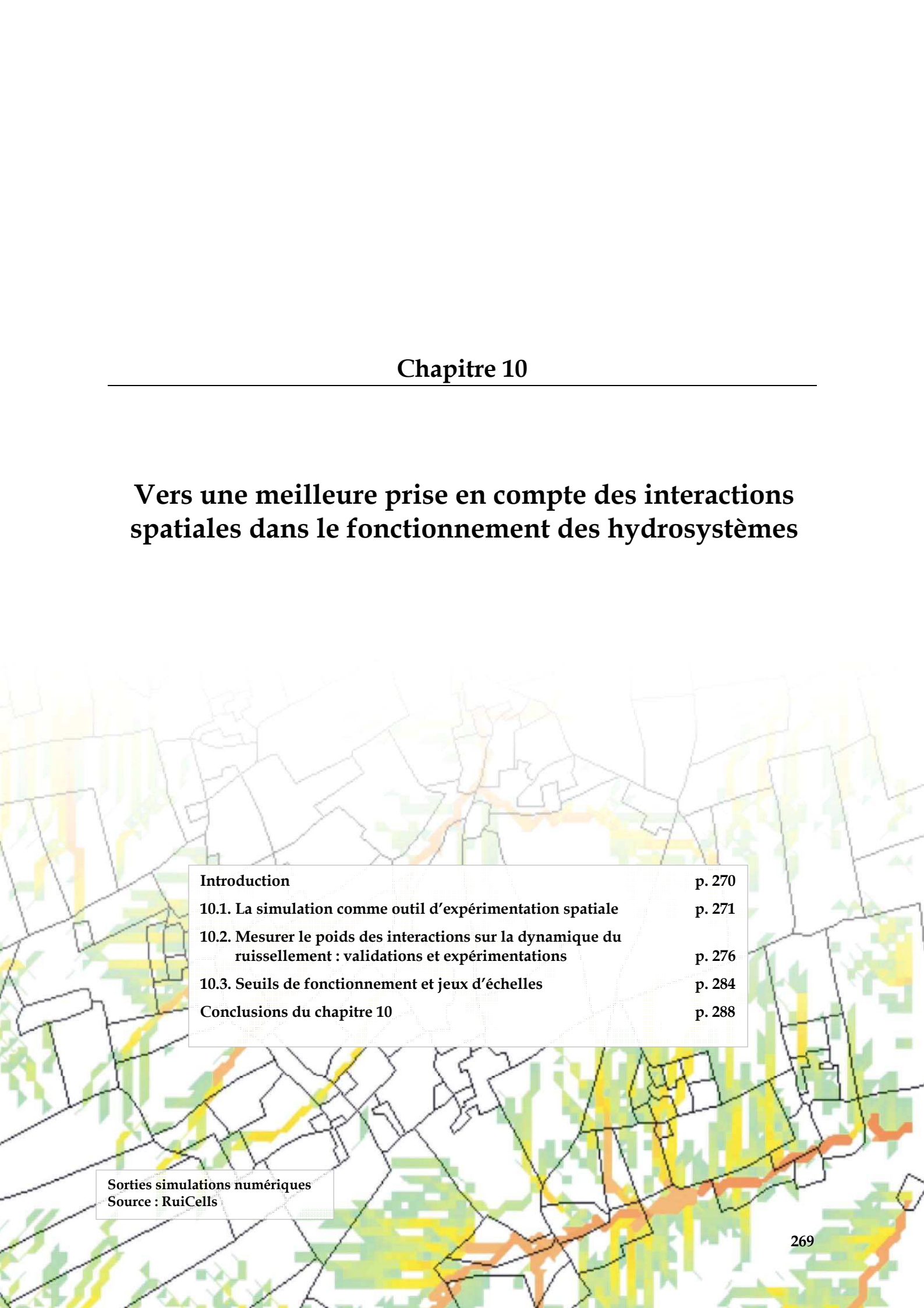
Introduction p. 270

10.1. La simulation comme outil d'expérimentation spatiale p. 271

10.2. Mesurer le poids des interactions sur la dynamique du ruissellement : validations et expérimentations p. 276

10.3. Seuils de fonctionnement et jeux d'échelles p. 284

Conclusions du chapitre 10 p. 288



Sorties simulations numériques
Source : RuiCells

Introduction

L'incidence de la morphologie sur la réponse hydrologique d'un bassin a été commentée dans la troisième partie. Cette analyse a donné des résultats importants mais **il est désormais nécessaire d'intégrer ses relations avec les autres variables environnementales** (occupation du sol, pluies). S'il existe une relation évidente entre la taille des sous bassins, leur efficacité morphologique avec le volume écoulé, cette filiation peut, en effet, être largement modulée par les autres paramètres, et en particulier par l'organisation spatiale de l'occupation du sol. L'importance des échanges hydrologiques entre les parcelles et les relations de concurrence et/ou de complémentarité entre les surfaces ruisselantes ou réinfiltrantes, ont été soulignées dans de nombreux travaux (Papy et Douyer, 1988 ; Ludwig, 1992 ; Cerdan, 2001 ; Souchère *et al*., 2005 ; Soulsby *et al*., 2005) et suggérées à la fin du chapitre 6.

L'automate *RuiCells* a initialement été développé pour répondre à cette problématique. Le système se positionne entre la modélisation hydrologique classique (Estupina-Boreell *et al*., 2006) et les modèles de ruissellement/érosion qui ont fait l'objet de multiples investigations (King *et al*., 1992 ; Jetten *et al*., 1996 ; Hessel *et al*., 2003 ; Nearing *et al*., 2005 ; Souchère *et al.* 2005). Cet automate a été préféré dans le but de répondre aux objectifs suivants :

► **conserver des entrées simples et efficaces** pour éviter d'entrer dans une modélisation physique complexe et peu reproductible ;

► **appréhender la genèse puis la diffusion du ruissellement depuis les échelles locales jusqu'à l'échelle globale, de manière dynamique et continue dans l'espace** ;

► **mieux connaître le poids des interactions spatiales**. La deuxième partie a clairement montré des fonctionnements et des seuils de déclenchement variables sur les 189 bassins versants étudiés. Il faut alors évaluer la sensibilité des bassins aux conditions initiales ;

► aboutir à la **modélisation de la circulation des écoulements** au sein des bassins et à la reconstitution de ces résultats sous une forme **cartographique**.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de modélisation, mais surtout dans une démarche **exploratoire**. Il existe trop peu de données pour valider les résultats obtenus à partir des simulations numériques. Le but recherché ici n'est pas de valider les simulations et calibrer le modèle (= modélisation), mais plutôt de voir les effets de certains paramètres (= simulation). **On se place dans une logique différente des modèles proposés jusqu'à présent. L'idée est de combiner les interrelations verticales et horizontales entre les couches d'informations de façon à faire interagir l'ensemble et produire des phénomènes d'émergence.** Ce chapitre s'organise de la manière suivante : importance de la démarche exploratoire, puis choix des variables intégrées dans l'automate *RuiCells* et contraintes des simulations (§ 10.1.) ; tests et validations sur deux bassins versants (§ 10.2.) et expérimentations sur des bassins non jaugés (§ 10.3.) ; étude de la sensibilité des vallons à différentes conditions initiales (§ 10.4.).

Cette approche offre un **double intérêt** : **détecter le rôle des emboîtements d'échelles** et **le jeu des interactions spatiales sur la dynamique du ruissellement érosif en tout point de l'espace** ; **quantifier le rôle des composantes environnementales (pluie, occupation du sol) en lien avec l'efficacité morphologique des bassins étudiés.** A court terme, il est envisagé de confronter ces résultats avec d'autres modèles, et de transposer cette méthode à d'autres phénomènes, tels que les « *crues rapides* » du sud de la France par exemple (Lahousse, 1997).

10.1. La simulation comme outil d'expérimentation spatiale

10.1.1. Importance de la démarche exploratoire

Au préalable, il est important de rappeler la démarche **exploratoire** menée dans ce travail. T. Hägerstrand (1957) définit la **simulation** comme « *une méthode consistant à créer un univers artificiel à partir de lois, de théories ou d'hypothèses et à observer le comportement de cet artefact sous quelques aspects lorsque le modèle est soumis à des variations, notamment temporelles* ». Appliquée à la mesure de la dynamique spatiale du ruissellement, la simulation doit permettre de tester des hypothèses et de voir les influences des variables progressivement implémentées dans l'automate. Cette démarche ouvre des perspectives importantes en contexte de données rares (Delahaye *et al.*, 2007). Paradoxalement, les résultats doivent être utilisés avec précaution, vu le faible nombre de données hydrométriques et de stations de mesures sur les bassins étudiés pour valider et calibrer les paramètres du modèle (Langlois et Delahaye, 2002).

Deux postulats guident principalement cette étude :

- L'apparition des « *crues rapides* » résulte des interactions entre les processus spatiaux qui se produisent depuis les échelles locales. « *Le moteur du changement étant résolument spatial, tout changement sur la dynamique du ruissellement serait influencé par les interactions spatiales et par les configurations du voisinage* » (Daudé, 2004).

- Au lieu d'intégrer toutes les variables et de calibrer le modèle en ajustant les paramètres pour obtenir des débits réels, ce qui est le cas de la plupart des approches de type « *boîte noire* », on souhaite progressivement **mesurer les interactions entre les paramètres** au fur et à mesure de leur implémentation (fig. 10.1.). Ces variables doivent rester aussi simples que possibles afin de ne pas rendre la modélisation trop complexe[1] : l'augmentation des paramètres implémentés accroît le jeu des interactions entre les différentes variables.

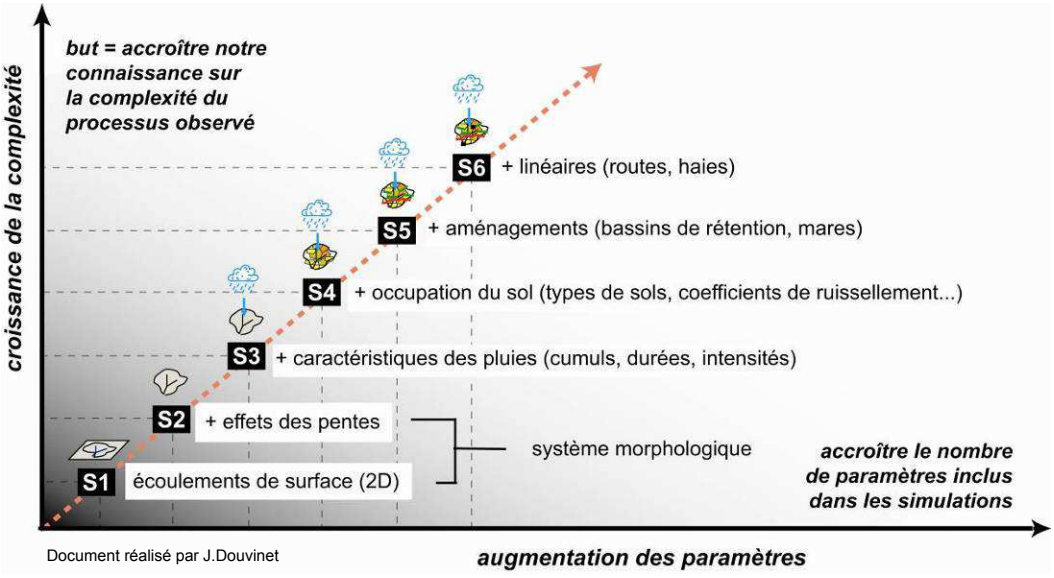


Fig. 10.1. Intégration progressive des paramètres au sein des simulations.

[1] On suit une démarche d'analyse commune à la philosophie : « *KIDS = Keep it descriptive, simplicity* » (Ecole thématique, Porquerolles, 2006). La simplicité des paramètres doit permettre de faciliter l'analyse du fonctionnement du système.

La démarche doit progressivement permettre de mettre en avant :
- les effets de forme d'un bassin, associés à son réseau (2D) **(S1)** (cf. chapitre 9) ;
- l'incidence du système morphologique en intégrant les pentes **(S2)** (cf. chapitre 9) ;
- les interactions avec le type de pluies (**S3**) et la nature de l'occupation du sol, associée à différents coefficients, qui vont pondérer la quantité de ruissellement produite **(S4)** ;
- l'incidence des aménagements linéaires (haies, routes) ou hydrologiques (mares) **(S5)** …

Cette approche doit permettre de donner du sens à des règles simples, plutôt que de chercher à reproduire fidèlement la réalité (Coulthard *et* al., 2005). Une fois les paramètres définis, le jeu des interactions devient plus facile à analyser. *« Cette possibilité de simuler le fonctionnement du système (…) possède une grande souplesse car elle permet d'envisager un grand nombre de paramétrages, de faire varier les conditions initiales, même de manière irréaliste, et de voir rapidement les conséquences, ce qui ne peut être expérimenté dans la réalité »* (Langlois, 2005). Cette démarche offre également la possibilité de contrôler le processus de simulation ; **on maîtrise à la fois les données d'entrée et les sorties corollaires**.

10.1.2. Variables implémentées

La représentation cartographique des écoulements de surface ne se limite plus seulement à la dynamique induite par la topographie du bassin versant. Le moteur de chaque cellule a été enrichi de nombreuses fonctionnalités qui permettent d'**effectuer un bilan hydrologique complet à chaque pas de temps de calcul** (fig. 10.2.). Il est possible d'implémenter diverses informations issues d'une base de données géographiques (occupation du sol, aménagement, réseau routier, etc.), le tout étant géré par un SIG (Système d'Information Géographique). Le fonctionnement de l'automate et les paramètres de calage, simplifiés par rapport à la réalité de certains processus (Annexe 5.2.) ont déjà fait l'objet de plusieurs publications (Langlois et Delahaye, 2002 ; Langlois, 2005, 2007 ; Gaillard *et al*., 2008). On revient ici sur la **nature des principales variables implémentées**, et non sur le paramétrage du modèle (Annexe 8.2.).

Des pluies de différente intensité peuvent, tout d'abord, être intégrées :

1 - des *« pluies-projet » :* l'utilisateur définit au début de la simulation une hauteur d'eau globale en millimètres. Les valeurs peuvent correspondre à des intensités dont la période de retour a été calculée à l'aide de formules (de type Montana par exemple). L'algorithme temporel se charge ensuite de répartir l'eau sur les cellules à chaque pas de temps.

2 – des *« pluies réelles »* **:** ce sont des hauteurs estimées par les images radar ou réellement mesurées par des pluviographes. Les volumes de pluie et les pas de temps sont variables en fonction des données. La variabilité spatiale des pluies, qui a un rôle important en cas d'épisodes orageux (Anquetin *et al*., 2003), peut être considérée en limitant la pluie à une seule partie du bassin versant. Un lien avec les images radar, disponibles à partir du réseau ARAMIS (Météo France) sous format raster, pourrait être envisagé à court terme.

Des **coefficients** peuvent ensuite être attribués à chaque parcelle en **fonction de la nature de l'occupation du sol**. Celle-ci provient du découpage parcellaire cartographié sous SIG que l'on intègre directement dans l'automate. On procède au transfert des données zonales, des parcelles aux triangles du maillage défini par le Modèle Numérique de Terrain. Lorsqu'un triangle chevauche deux parcelles, on prend comme valeur du triangle le coefficient de la parcelle dans laquelle se localise son centre de gravité (Langlois et Delahaye, 2002).

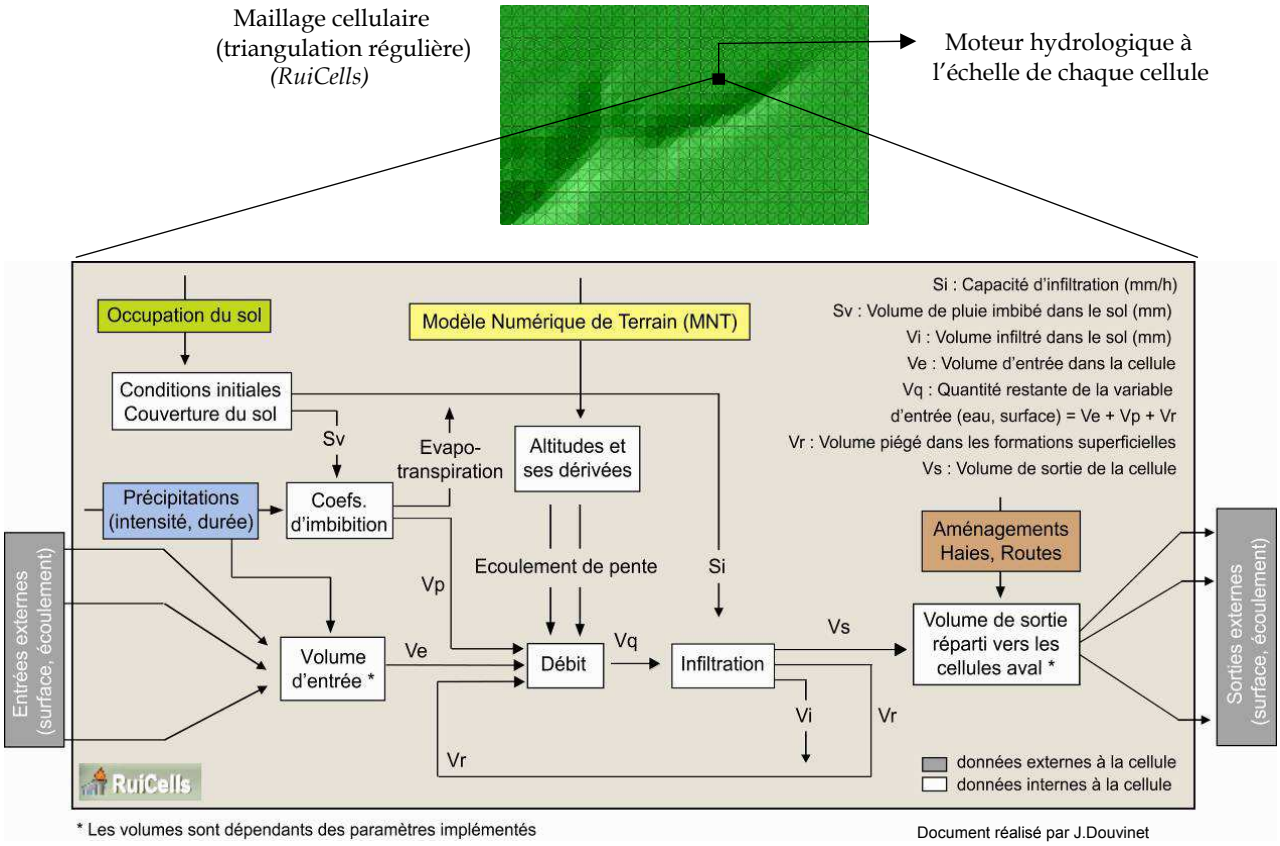
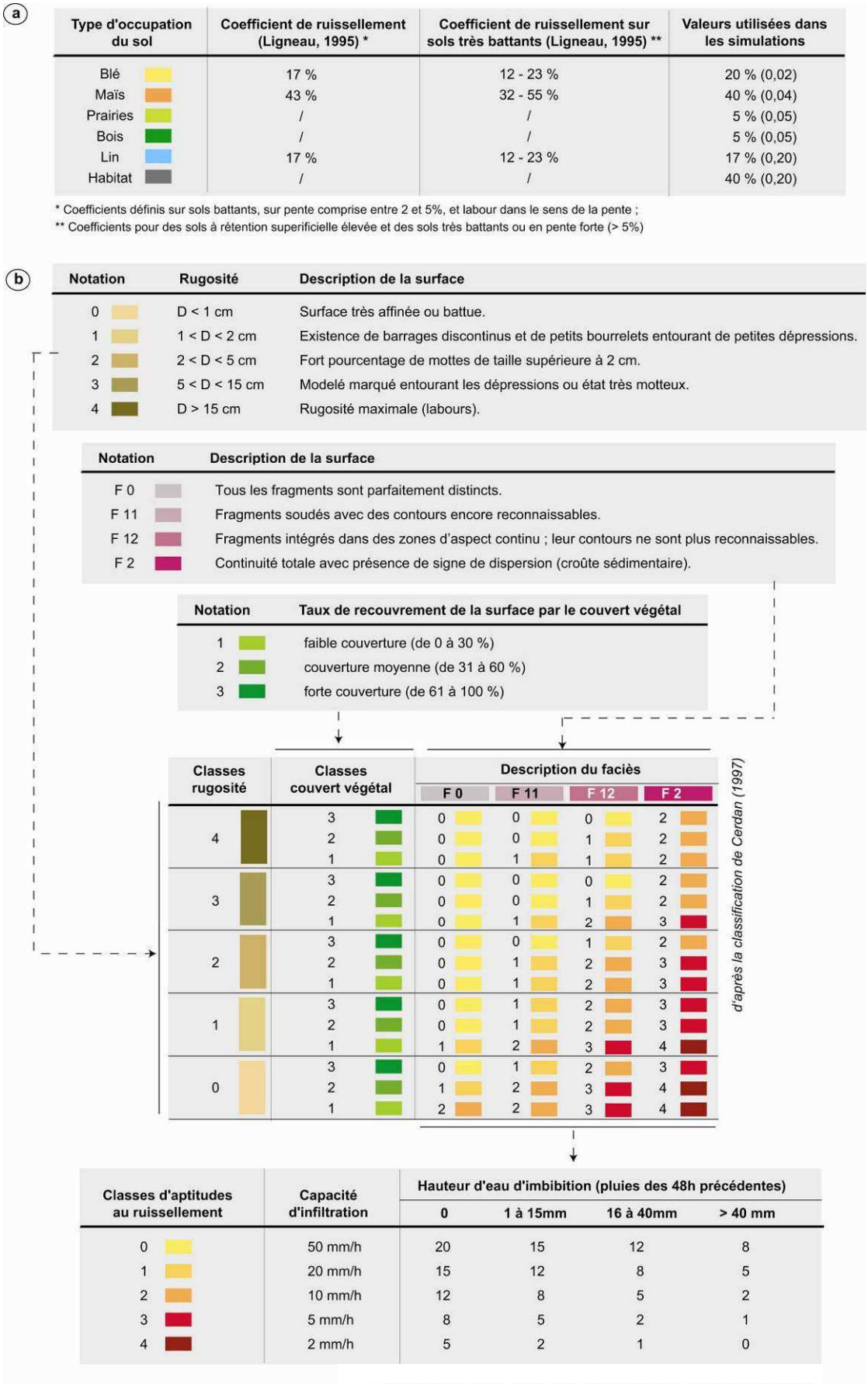


Fig. 10.2. Moteur hydrologique dans chaque cellule (modifié d'après Langlois, 2007).

D'un côté, il est possible d'effectuer le bilan hydrologique en utilisant des **coefficients de ruissellements adaptés à chaque type d'occupation du sol. Les valeurs sont celles qui sont régulièrement admises pour des évènements pluvieux de nature orageux et de récurrence décennale** dans les régions de grande culture (Ligneau, 1995). Les coefficients correspondent à des pourcentages de production par rapport à la pluie brute (fig. 10.3.). Leur utilisation est pertinente pour cette étude car toutes les surfaces sont censées contribuer au ruissellement vu les intensités des pluies à l'origine des «*crues rapides* ». Elles peuvent être remises en cause pour des pluies plus faibles puisque, dans ce cas-là, certaines surfaces ne produisent plus de ruissellement ; elles favorisent également la réinfiltration d'une partie de l'eau venant des surfaces voisines si elles se situent sur les axes des écoulements.

D'un autre côté, des capacités d'infiltration associées à une hauteur d'imbibition, peuvent être intégrées. **L'infiltrabilité tient compte de l'état de surface, caractérisé par une rugosité et un faciès, et du taux de recouvrement du couvert végétal à un instant donné** (Cerdan *et al.*, 2002). L'apparition du ruissellement par le refus d'infiltration dans un sol initialement non saturé correspond à la théorie définie par R.E. Horton en 1933 (Cosandey et Robinson, 2000). H. Benkhadra (1997) a proposé, à partir des travaux réalisés dans le Pays de Caux par l'INRA, une méthode d'évaluation en fonction des caractéristiques locales et saisonnières. Cette évaluation a été affinée par les travaux de V. Lecomte (1999) et O. Cerdan (2001). Trois paramètres sont finalement croisés (fig. 10.3b.) ; ils permettent de définir différentes classes d'aptitude au ruissellement. Ces valeurs sont choisies en tenant compte d'une classification hiérarchique et en se basant sur les observations de terrain afin d'être le plus proche possible de la réalité. Les pluies des 48 h précédentes définissent des hauteurs d'imbibition associées.



a

Type d'occupation du sol	Coefficient de ruissellement (Ligneau, 1995) *	Coefficient de ruissellement sur sols très battants (Ligneau, 1995) **	Valeurs utilisées dans les simulations
Blé	17 %	12 - 23 %	20 % (0,02)
Maïs	43 %	32 - 55 %	40 % (0,04)
Prairies	/	/	5 % (0,05)
Bois	/	/	5 % (0,05)
Lin	17 %	12 - 23 %	17 % (0,20)
Habitat	/	/	40 % (0,20)

* Coefficients définis sur sols battants, sur pente comprise entre 2 et 5%, et labour dans le sens de la pente ;
** Coefficients pour des sols à rétention superficielle élevée et des sols très battants ou en pente forte (> 5%)

b

Notation	Rugosité	Description de la surface
0	D < 1 cm	Surface très affinée ou battue.
1	1 < D < 2 cm	Existence de barrages discontinus et de petits bourrelets entourant de petites dépressions.
2	2 < D < 5 cm	Fort pourcentage de mottes de taille supérieure à 2 cm.
3	5 < D < 15 cm	Modelé marqué entourant les dépressions ou état très motteux.
4	D > 15 cm	Rugosité maximale (labours).

Notation	Description de la surface
F 0	Tous les fragments sont parfaitement distincts.
F 11	Fragments soudés avec des contours encore reconnaissables.
F 12	Fragments intégrés dans des zones d'aspect continu ; leur contours ne sont plus reconnaissables.
F 2	Continuité totale avec présence de signe de dispersion (croûte sédimentaire).

Notation	Taux de recouvrement de la surface par le couvert végétal
1	faible couverture (de 0 à 30 %)
2	couverture moyenne (de 31 à 60 %)
3	forte couverture (de 61 à 100 %)

Classes rugosité	Classes couvert végétal	Description du faciès F 0	F 11	F 12	F 2
4	3	0	0	0	2
	2	0	0	1	2
	1	0	1	1	2
3	3	0	0	0	2
	2	0	0	1	2
	1	0	1	2	3
2	3	0	0	1	2
	2	0	1	2	3
	1	0	1	2	3
1	3	0	1	2	3
	2	0	1	2	3
	1	1	2	3	4
0	3	0	1	2	3
	2	1	2	3	4
	1	2	2	3	4

d'après la classification de Cerdan (1997)

Classes d'aptitudes au ruissellement	Capacité d'infiltration	Hauteur d'eau d'imbibition (pluies des 48h précédentes) 0	1 à 15mm	16 à 40mm	> 40 mm
0	50 mm/h	20	15	12	8
1	20 mm/h	15	12	8	5
2	10 mm/h	12	8	5	2
3	5 mm/h	8	5	2	1
4	2 mm/h	5	2	1	0

Fig. 10.3. a) Choix des coefficients de ruissellement ; **b)** Structuration hiérarchique pour définir les capacités d'infiltration pour différentes classes (modifié d'après Cerdan, 2001).

La **part ruisselée** dans chaque cellule peut, dès lors, être estimée de plusieurs manières :
- soit le moteur fonctionne avec un simple coefficient de ruissellement ;
- soit on utilise une capacité d'infiltration pour l'ensemble de l'événement (fig. 10.3.) ;
- soit l'automate effectue des calculs à pas de temps fin (60 s, 1h) défini par l'utilisateur.

Le système garde en mémoire le volume d'eau stocké dans le sol afin de pouvoir estimer l'état de saturation du sol. L'excédent d'eau (ruissellement) est distribué vers les cellules en aval en fonction de la topographie locale (graphe d'écoulement). Ce bilan ne se limite donc pas seulement à l'eau précipitée dans la cellule ; il intègre également les apports des cellules voisines situées en amont. Cette **analyse, continue et en tout point de l'espace,** est l'un des principaux intérêts de l'automate cellulaire ; il permet de simuler les réinfiltations possibles du ruissellement entre les parcelles ruisselantes.

Cette méthode basée sur la connexion entre toutes les surfaces du bassin est le moyen de comprendre comment un ruissellement important peut se développer sur certaines surfaces sans réussir à rejoindre l'exutoire. Il s'agit *a priori* d'un bon moyen pour analyser le transfert d'échelle qui s'opère de la parcelle à l'exutoire du bassin versant, et pour faire la distinction entre les phénomènes chroniques qui vont toucher une petite partie du bassin versant, et les phénomènes exceptionnels qui vont l'affecter dans son ensemble (Gaillard *et al*., 2008).

10.1.3. Apports et contraintes des simulations

Certains chercheurs ont déjà développé des modèles déterministes ou semi-déterministes pour simuler la dynamique spatiale du ruissellement érosif, comme par exemple LISEM, SWAT, MEFIDIS, RUSLE, STREAM, KINEROS, WEPP (De Roo, 1993 ; Jetten *et al*., 1996 ; Jetten et De Roo, 2001 ; Poesen *et al*., 2003 ; Amore *et al*., 2004 ; De Vente et Poesen, 2005 ; Souchère *et al*. 2005). Nearing *et al* (2005) proposent d'ailleurs une synthèse sur les données d'entrées et de sorties de ces sept modèles qui ont été calibrés sur bon nombre d'événements.

Toutefois, la plupart de ces modèles sont lourds d'utilisation en raison d'un important besoin de données d'entrées, notamment agronomiques (Jetten, 1993 ; Hessel *et al*., 2003). Ces modèles tentent de relier les résultats des expériences menées au champ ou en laboratoire, avec les processus réels mesurés à l'échelle des parcelles expérimentales. Ces modèles sont, alors éloignés de cette recherche qui porte plus spécifiquement sur le rôle de la morphologie et sur le jeu des interactions spatiales avec les autres composantes.

Le système proposé présente, en revanche, un certain nombre de contraintes :
- l'automate a été **simplifié** par rapport à des modèles hydrologiques classiques ;
- la vitesse d'écoulement tient uniquement compte d'une lame d'eau et de la pente d'une cellule (Annexe 8.2.) ;
- l'affectation des valeurs parcellaires est tributaire de la résolution du maillage cellulaire.

Le recours à l'automate permet, en revanche, de simplifier des phénomènes complexes en se focalisant sur certains paramètres (Pumain, 2003). On fait ainsi appel à des modes de simplification pour tester différentes hypothèses.

10.2. Mesurer le poids des interactions spatiales sur la dynamique du ruissellement : validations et expérimentations

Dans un premier temps, on s'intéresse aux interactions entre les différentes composantes du système bassin versant. La démarche permet aussi de discuter la fiabilité des coefficients de ruissellement pour simuler de tels événements. Les crues du 16 juin 1997 sur les bassins de St-Martin-de-Boscherville et Villers-Ecalles (76) ont été retenues pour cette démonstration. Les simulations ont été comparées aux résultats d'une modélisation hydraulique proposée par le Cemagref et aux estimations faites d'après les laisses de crues (Delahaye *et al*., 2001).

10.2.1. Etude des simulations obtenues sur le bassin de St-Martin-de-B. (76)

Une simulation est tout d'abord proposée sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville, en implémentant les cumuls des pluies estimés par des pluviographes (rapportés sur un pas de temps de 30 minutes), la nature de l'occupation du sol (carte réalisée au lendemain de la crue par D. Delahaye, 1999) et des coefficients de ruissellement moyens (valeurs régionales).

La carte des écoulements simulés (fig. 10.4.) met rapidement en évidence la **coexistence spatiale** entre les zones morphologiquement efficaces et les zones sensibles au ruissellement. Les écoulements se sont rapidement concentrés dans la partie amont, les surfaces cultivées alimentant les axes des écoulements guidés par la structuration morphologique de cette zone dont l'efficacité a déjà été démontrée. Si les surfaces boisées, situées en aval, ont produit peu de ruissellement, elles n'ont pas pu contenir les écoulements déjà fortement concentrés.

L'information obtenue est beaucoup plus riche que celle issue d'un simple croisement statique entre différentes couches. L'effet des connexions entre les surfaces qui fournissent du ruissellement (surfaces cultivées et urbanisées), et celles qui en subissent les conséquences sans y contribuer (prairies, zones boisées), est clairement démontré. Les gammes colorées symbolisent la croissance des écoulements qui se sont concentrés depuis la partie amont.

Cet exemple souligne également à quel point il est important de considérer **l'agencement spatial de l'occupation du sol.** A l'échelle globale, les surfaces cultivées ne représentent que 22 % de la surface totale. Néanmoins, plus que leur importance relative, c'est la localisation de ces surfaces qui est prépondérante. Dans ce cas donné, les surfaces ruisselantes se situent sur les plateaux, et elles sont majoritaires dans les trois sous bassins principaux.

Les simulations permettent finalement de montrer toute l'importance de la localisation des composantes de l'occupation du sol au sein du bassin en lien avec la morphologie. Les effets néfastes des grands îlots cultivés sur les plateaux, associés à des noyaux urbanisés, sont bien visibles (Vandewiele, 1998 ; Delahaye, 1999 ; 2002). **En disposant de données simples, il est finalement possible de construire une représentation cartographique de la dynamique du ruissellement en tout point de l'espace.**

Les volumes d'eau simulés sont proches de ceux estimés par le Cemagref en utilisant le modèle G*R4 H* (MISE-AREAS, 1997). Les résultats donnés par l'automate à différents points de mesure sont situés dans les fourchettes fixées par la modélisation hydraulique. Toutefois, en l'absence de mesures *in situ*, ces valeurs sont délicates à interpréter et les experts ont pris soin de fournir des estimations avec des intervalles de confiance allant du simple au double.

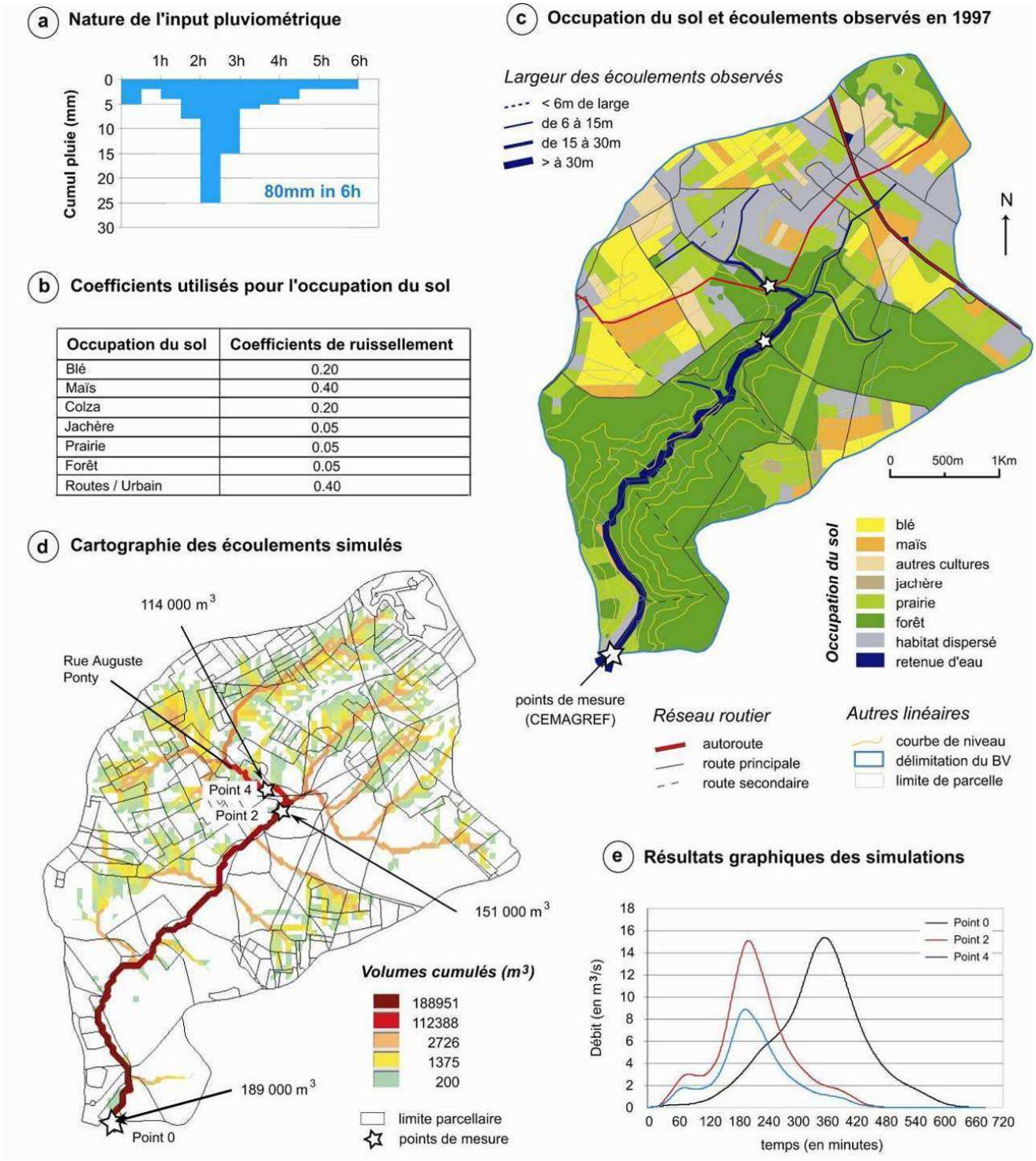


Fig. 10.4. Valeurs implémentées **(a, b, c)**, comparaison entre les écoulements observés (**c),** et carte des écoulements simulés **(d, e)** sur St-Martin (modifié d'après Vandewiele, 1998 ; Delahaye, 2002).

Les débits de pointe sont proches, voire légèrement supérieurs, des hypothèses hautes, et en particulier dans la partie intermédiaire. Le débit simulé (15,1 $m^3.s^{-1}$) au point 2 dépasse l'intervalle de confiance fixé par la modélisation hydraulique (9- 13 $m^3.s^{-1}$). Cette observation peut s'expliquer par l'absence de prise en compte dans la simulation de l'effet d'écrêtage du remblai de l'autoroute, qui traverse le bassin dans la partie amont (tab. 10.1.).

Estimations (CEMAGREF)				Résultats des simulations (RuiCells)			
Points de mesure	Pics de crues (m3/s)	Volumes estimés (en milliers de m3)	Taille du bassin (ha)	Points de mesure *	Pics de crues (m3/s)	Volumes estimés (en milliers de m3)	Taille du bassin (ha)
point 1	7 - 10	129 - 185	340	point 4	8,9	114	340
point 2	9 - 13	163 - 240	745	point 2	15,1	151	745
point 3	9 - 15	175 - 277	1430	point 0	15,4	189	1430

* Les points de mesure (identiques dans les deux cas) font référence aux précédents points utilisés dans la partie III

Tab. 10.1. Comparaison des valeurs estimées (Cemagref) et simulées (*RuiCells*).

10.2.2. Résultats obtenus sur le bassin de Villers-Ecalles (76)

Une seconde simulation est proposée sur le bassin de Villers-Ecalles (76) en intégrant des **paramètres** (pluies, coefficients de ruissellement) **identiques** à ceux précédemment utilisés. Une « *crue rapide* » est apparue sur ce vallon (13,4 km²) à la suite du même épisode pluvieux, mais l'occupation du sol et les caractéristiques morphologiques sont différentes. Il convient, au préalable, de rappeler la cinématique des écoulements. En certains endroits, les drains latéraux ont contribué à alimenter les ruissellements de manière importante et les dégâts sont importants dans les parties amont (sur Roumare par exemple). La majeure partie des formes d'érosion et des dégradations se situe dans le fond du talweg principal. Une « *vague de boue* » (> 2 m) a déferlé à l'exutoire (fig. 10.5a.), emmenant plusieurs voitures qui se sont encastrées et mélangées à des flottants dans le lotissement de Villers.

La carte des écoulements simulés (fig. 10.5.) met à nouveau en évidence **l'importance des connexions entre les zones de production et les axes de concentration des écoulements.** La part des terres cultivées est nettement plus importante sur ce bassin (51% de la surface totale) et les ruissellements se sont formés très tôt en amont du bassin. Le flux turbide s'est ensuite acheminé vers le talweg principal, suite à différentes concentrations successives.

La carte des écoulements montre surtout une relation différente entre l'occupation du sol et la morphologie (fig. 10.5.). Les écoulements se sont concentrés de manière progressive, ce qui se traduit par une croissance régulière des volumes et des débits. **La part des surfaces cultivées compense un système morphologique moins réactif que sur St-Martin.**

Les volumes sont compris dans les intervalles de confiance définis lors de la modélisation hydraulique (tab. 10.2.). Les valeurs sont surestimées dans la partie amont car l'autoroute a déconnecté les parcelles qui sont situées dans la partie est du bassin (fig. 10.5d.).

Estimations (CEMAGREF)				Résultats des simulations (RuiCells)			
Points de mesure	Pics de crues (m3/s)	Volumes estimés (en milliers de m3)	Taille du bassin (ha)	Points de mesure *	Pics de crues (m3/s)	Volumes estimés (en milliers de m3)	Taille du bassin (ha)
point 1	3 - 6	55 - 92	558	point 2	7,1	80	558
point 2	8 - 15	148 - 287	962	point 1	12,2	152	962
point 3	12 - 23	148 - 369	1442	point 0	18	225	1442

* Les points de mesure (identiques dans les deux cas) font référence aux précédents points utilisés dans la partie III

Tab. 10.2. Comparaison des valeurs estimées (Cemagref) et simulées (*RuiCells*).

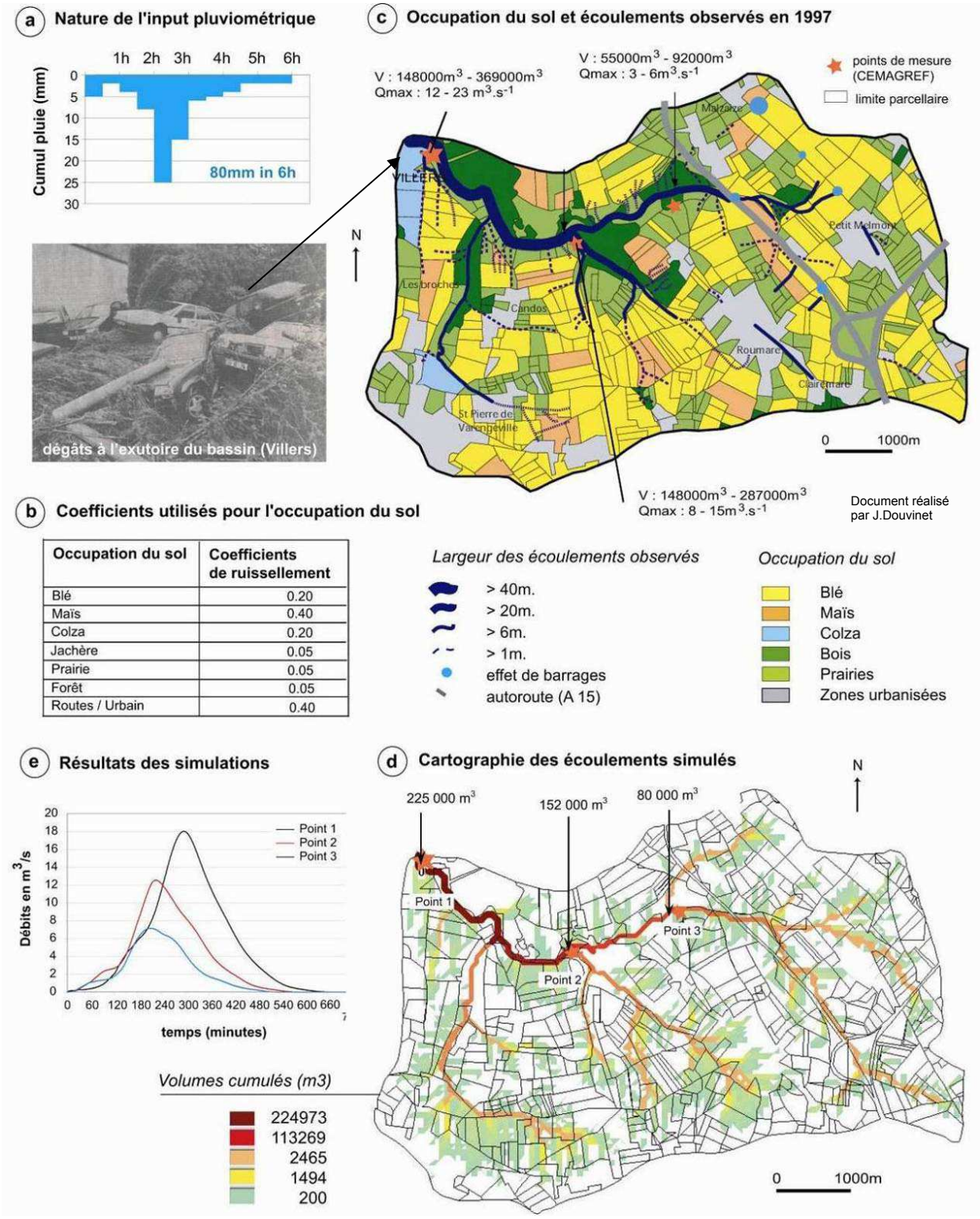


Fig. 10.5. Valeurs implémentées (**a, b, c**) et comparaison entre les écoulements observés (**c)** et les écoulements simulés (**d, e**) sur le bassin de Villers-Ecalles (modifié d'après Delahaye *et al*, 2007).

Les débits de pointe estimés au point 0 (18 $m^3.s^{-1}$), au point 1 (12 $m^3.s^{-1}$) puis au point 2 (7 $m^3.s^{-1}$), se situent près des estimations hautes fournies par le modèle *GR4 H* (MISE-AREAS, 1997). Là encore, **il convient de rester prudent** sur la pertinence des approximations, et sur les résultats obtenus par les simulations en corollaire.

10.2.3. Essais de simulation sur deux bassins « *extrêmes* »

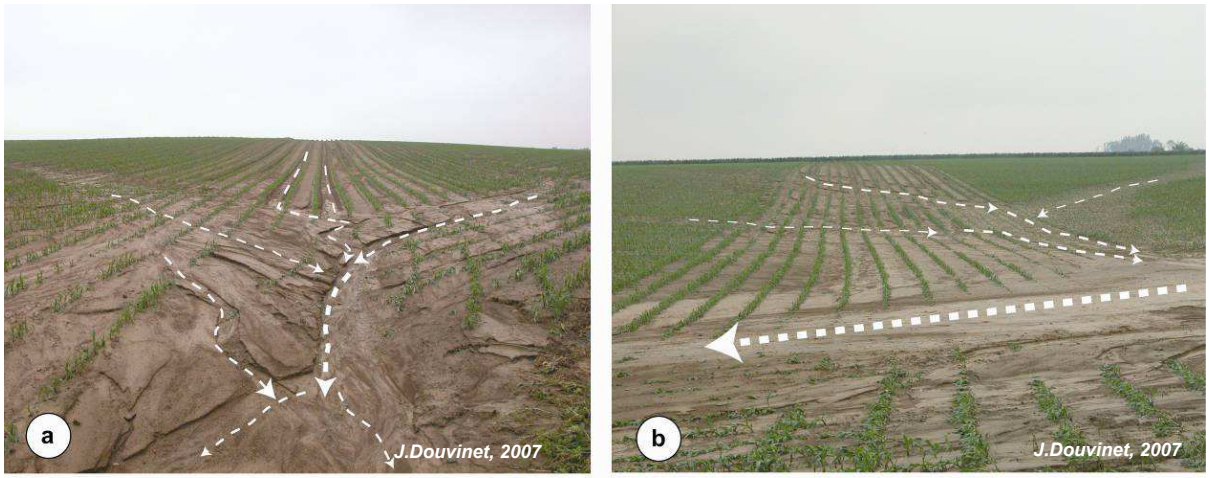
D'autres simulations sont proposées sur **deux bassins qui présentent des configurations « *extrêmes* ».** Le bassin d'Estreux (59), de petite taille (3,8 km²) et à faible pente, est fortement cultivé ; les surfaces potentiellement ruisselantes représentent 91 % de la surface totale. A l'opposé, le bassin du Callenville, de taille proche (3,1 km²) est plus pentu et majoritairement enherbé. Ces deux bassins (**type 1**) sont situés dans des contextes morphologiques variés.

Une **simulation test** a tout d'abord été réalisée sur les deux bassins (Annexe 10.1.). Le but recherché était de confronter ces résultats avec ceux obtenus par la méthode rationnelle pour obtenir un minimum de validation. Les écarts (- 10% et – 11 % respectivement pour le bassin d'Estreux et de Callenville) sont faibles si on accorde un intervalle de confiance de +/- 10 % à cette formule empirique (Annexe 10.1.).

Le bassin d'Estreux est tout d'abord présenté (fig. 10.7.). La partie amont du bassin a été déconnectée : contrairement aux exemples précédents, une partie des eaux est restée bloquée dans les parcelles situées en amont de la route. La simulation est proposée en intégrant i) les pluies estimées par les radars le 7 juin 2007 (70 mm en 1 h 30, rapportés sur un pas de temps de 15 minutes) et ii) des coefficients de ruissellement moyens.

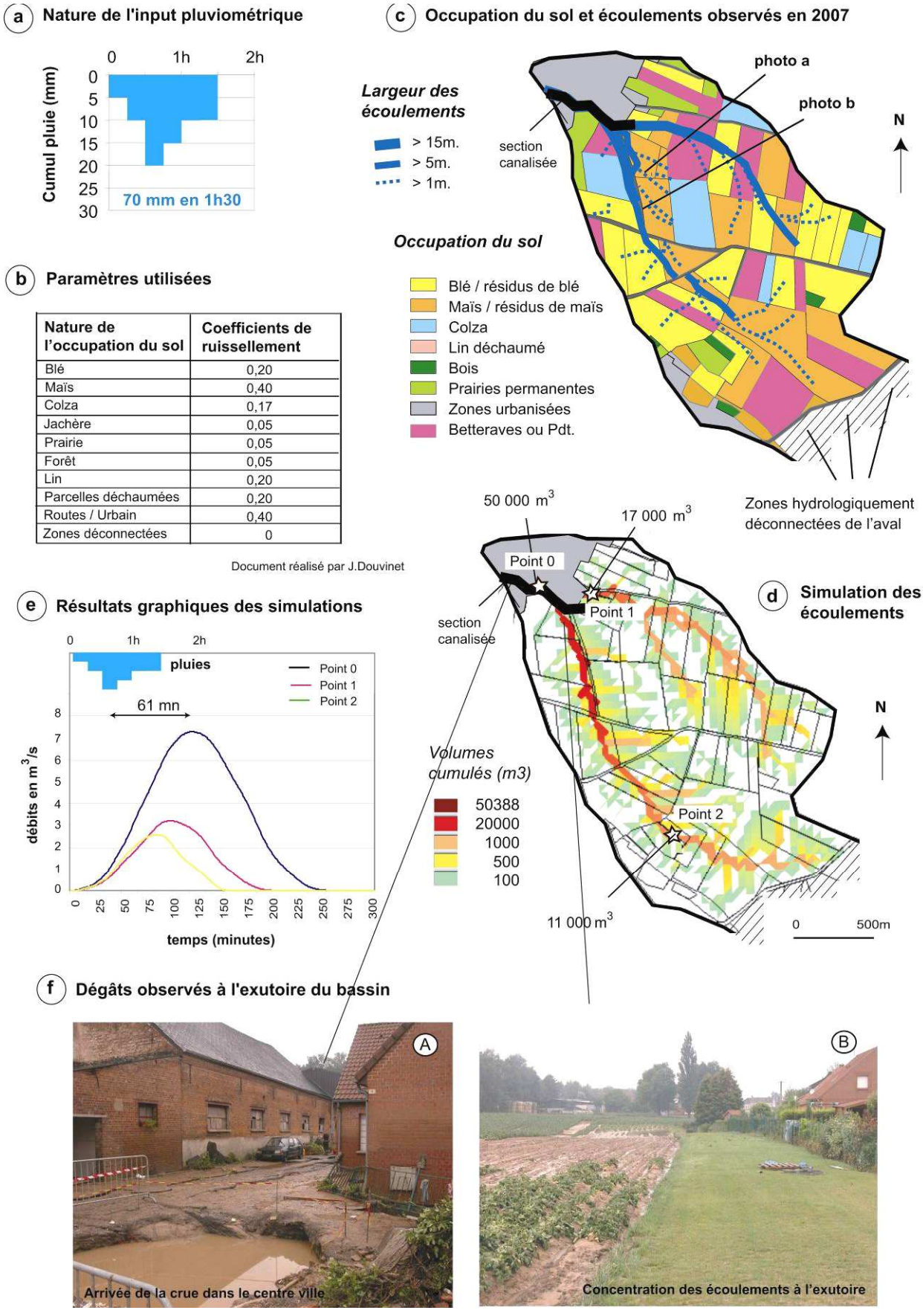
La carte des écoulements simulés (fig. 10.4.) met rapidement en évidence la **réactivité de la partie aval**, notamment la connexion entre les parcelles de maïs peu couvrantes (fig. 10.6.) et les axes des écoulements. Le temps de concentration estimé par l'automate (**61 minutes**) est assez proche de la valeur moyenne obtenue à partir des formules de Ventura, Kirplich et Passini (68 minutes). Si les dégâts sont restés mineurs sur le reste du bassin, la totalité des maisons situées dans l'axe principal des écoulements, à l'exutoire, a été sinistrée. Les eaux se sont accumulées jusqu'à plus de 2 m de hauteur dans une cuvette située en aval d'Estreux.

Les cultures de printemps (maïs), associées aux cultures industrielles (pommes de terre et betteraves), ont produit d'importantes quantités de ruissellement sur l'ensemble du bassin. Les volumes ruisselés (50 388 m^3) et le débit de pointe (7,4 $m^3.s^{-1}$) sont considérables dans ce petit bassin de 3,8 km² (fig. 10.7.).



Légende: a) Imbrication des formes érosives associant des griffures et des micro-rigoles sur un semis de maïs peu couvrant ; **b)** Connexion entre la parcelle de maïs et l'axe d'écoulement (drain principal sur le vallon d'Estreux). La taille des flèches est proportionnelle aux quantités de ruissellements ; elles indiquent également la direction des écoulements.

Fig. 10.6. Photos prises au lendemain de la crue du 7 juin 2007 sur le bassin d'Estreux (59).



Nature de l'occupation du sol	Coefficients de ruissellement
Blé	0,20
Maïs	0,40
Colza	0,17
Jachère	0,05
Prairie	0,05
Forêt	0,05
Lin	0,20
Parcelles déchaumées	0,20
Routes / Urbain	0,40
Zones déconnectées	0

Fig. 10.7. Valeurs implémentées (**a, b, c**) et comparaison entre les écoulements observés (**c**) et les écoulements simulés (**d, e**) sur le bassin d'Estreux (59).

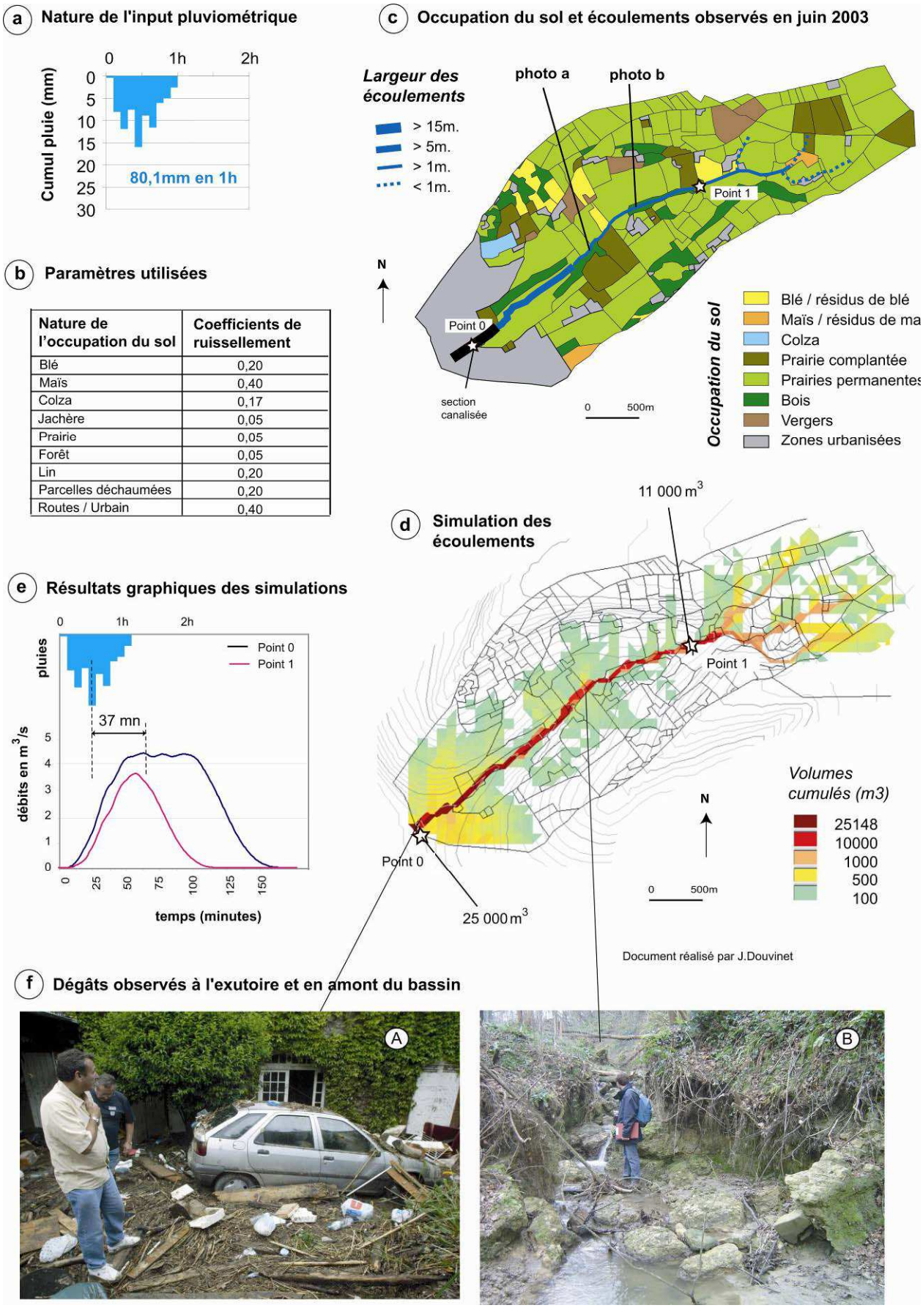


Fig. 10.8. Valeurs implémentées (**a, b, c**) et écoulements simulés (**d, e**) sur le bassin de Callenville.

Le coefficient de ruissellement mesuré à l'échelle globale (**20** %) indique une **sensibilité** élevée en cas de pluies de forte intensité. La part des surfaces ruisselantes et un volume de pluie important sur une courte durée, compensent largement l'inefficacité morphologique du bassin, liée à la fois à son allongement et à un faible degré d'encaissement.

Une simulation est ensuite proposée sur le bassin de Callenville, en implémentant i) les intensités des pluies relevées toutes les 6 minutes à la station de Deauville (78 mm en 1h) ; ii) des coefficients de ruissellement moyens (fig. 10.8.).

La carte des écoulements simulés montre un comportement totalement différent sur ce bassin. La partie amont s'encaisse très rapidement et elle est alimentée par trois vallons secondaires. Malgré l'omniprésence de surfaces enherbées, l'organisation des talwegs et leur encaissement sont suffisamment importants pour engendrer des débits dès la zone amont. Une fois concentrés, les ruissellements ont entraîné d'importants dommages matériels dans le fond du talweg principal et ce, jusqu'à l'exutoire : incision du fond du lit, ponts détruits, seuils comblés, aménagements effondrés, etc. Les écoulements sont ensuite apparus dans le centre de Trouville après la chute d'un mur situé au niveau du point 0 (fig. 10.8.).

10.2.4. Discussions

Si le chapitre 6 avait suggéré l'importance de l'agencement spatial de l'occupation du sol, l'automate en traduit **les effets de manière dynamique et continue dans l'espace**. Toutes les simulations permettent d'associer le poids de l'architecture des réseaux et de l'organisation spatiale des sous bassins avec la distribution des surfaces ruisselantes et l'intensité des pluies. **La réactivité de ces bassins peut alors s'expliquer de plusieurs manières** :

- un premier contrôle est d'ordre morphologique (cf. chapitre 5) : les bassins versants ont des pentes élevées quand ils se raccordent à des vallées humides sur de courtes distances. Ils sont ainsi caractérisés par un saut d'ordre dans la classification de Strahler ;

- un deuxième contrôle est lié à la structuration interne de ces bassins (cf. chapitre 9) : **les écoulements de surface sont principalement guidés par l'organisation morphologique des bassins versants**. La forme des bassins, l'organisation des réseaux de talwegs, et les pentes, favorisent la concentration plus ou moins rapide des flux turbides ;

- un troisième contrôle dépend de l'agencement spatial de l'occupation du sol. Toutes les surfaces potentiellement ruisselantes sont situées dans les parties amont (cf. chapitre 6), et elles alimentent les têtes des vallons secondaires, puis le fond du vallon principal. Plus que la part des surfaces cultivées, c'est donc leur localisation qui a un rôle majeur.

- un quatrième contrôle est lié à la **distribution des espaces vulnérables** par rapport aux axes d'écoulement. Les zones bâties sont systématiquement touchées aux exutoires, mais les dégâts peuvent également être importants très tôt en amont des bassins. Ces surfaces contribuent également à accélérer la vitesse de propagation des écoulements.

Ces résultats mettent en avant la multiplicité des échelles qu'il faut combiner pour mieux comprendre le fonctionnement d'un bassin versant. Les variables de « *contrôle* » interagissent mutuellement : la première définit une certaine zonation spatiale des espaces sensibles ; les effets de la morphologie et de l'occupation du sol se compensent, se complètent ou ont des effets aggravants lorsqu'elles sont associées, comme c'est le cas sur le bassin de St Martin.

Ces premières simulations montrent également que les coefficients de ruissellement sont **une variable d'entrée suffisante** pour reproduire la dynamique de ces épisodes. Etant donné l'intensité des pluies, toutes les surfaces produisent du ruissellement (Delahaye, 1999, 2002), **et les zones de réinfiltration sont inexistantes**. En revanche, ce principe n'est pas applicable pour des pluies plus faibles : certaines surfaces ne vont pas produire du ruissellement et elles peuvent même réinfiltrer une partie du ruissellement lorsqu'elles se situent sur les axes des écoulements. Dans ce cas-là, il faut utiliser les capacités d'infiltration, associées à une hauteur d'imbibition, pour simuler le ruissellement suite à des pluies de moindre intensité.

10.3. Seuils de fonctionnement et jeux d'échelles

Le fait d'utiliser les capacités d'infiltration peut également permettre de mettre en avant les jeux d'échelles qui existent entre la production du ruissellement aux échelles locales (parcelle) et son apparition à l'échelle globale (bassin versant). C'est sur ce second point que cette étude s'oriente, notamment pour **mieux détecter les zones de départ du ruissellement**. Plusieurs travaux, développés par l'INRA, ont étudié l'évolution des capacités d'infiltration du sol en fonction des caractéristiques saisonnières et locales (Souchère, 1995 ; Le Bissonnais *et al.*, 1995, 1996 ; Cerdan, 2001). Cependant, les valeurs paraissent délicates à utiliser car elles sont avant tout adaptées à des phénomènes hivernaux (fig. 10.3.).

10.3.1. Simulation du ruissellement en utilisant des capacités d'infiltration : une transposition délicate pour les phénomènes orageux

Les capacités d'infiltration ont déjà été discutées par D. Delahaye (2002). La méthode de O. Cerdan (2001) accorde un rôle prépondérant au faciès et à la dégradation de la surface du sol sous l'effet de longues pluies. Le ruissellement devient réellement significatif lorsque le faciès atteint le stade F2. A ce moment, suivant la rugosité et le taux du couvert végétal, les aptitudes au ruissellement varient de la classe 2 à 4 (fig. 10.3.) avec une faible amplitude de la capacité d'infiltration (8 $mm.h^{-1}$). Lorsqu'un orage survient sur une culture de printemps, le plus souvent, la surface n'est pas altérée. Dans ce cas, la classe d'aptitude peut varier de 0 à 2 suivant la rugosité et le taux du couvert végétal, ce qui correspond à une amplitude de la capacité d'infiltration de l'ordre de 40 $mm.h^{-1}$. Cette variation de la capacité d'infiltration est très importante pour des surfaces qui peuvent présenter des caractéristiques voisines.

La méthode de O. Cerdan (2001) a été utilisée pour l'événement du 16 juin 1997. Il existe une incertitude à propos des états de surface. Les pluies survenues depuis le début du mois ont pu provoquer une première phase de dégradation du sol sur les semis de maïs. Par ailleurs, les périodes sèches ont sans doute permis la formation de fentes de dessiccation rompant la croûte de dépôts durant l'hiver (Delahaye, 1999).

En tenant compte de ces incertitudes, la capacité d'infiltration estimée par le modèle est toujours plus importante pour le maïs que pour le blé car la rugosité prend le pas sur le taux de couvert végétal pour la détermination de la classe d'aptitude au ruissellement. Or, l'étude menée au lendemain de la crue a abouti à des conclusions inverses puisque le ruissellement a toujours été plus important sur les cultures de printemps, et notamment le maïs. Le couvert végétal semble également jouer un rôle différent suivant le type de cultures : le blé, même à maturité, capte moins d'eau que le colza qui présente un couvert plus épais. **L'utilisation de**

cette méthode semble pertinente quand les pluies ne sont pas intenses ou que le faciès F2 est atteint. H. Benkhadra (1997) rappelle d'ailleurs, dans ses travaux, que le rôle de l'état de surface diminue lorsque l'intensité des pluies devient très forte.

10.3.2. Tests et validations : l'épisode du 16 juin 1997

L'événement du 16 juin 1997 a été utilisé pour confronter les résultats des simulations utilisant les capacités d'infiltration à ceux précédemment présentés. Les valeurs retenues lors des simulations sont, en partie, issues de l'étude de H. Benkhadra (1997). Les surfaces en pois, en lin et en céréales, ont été dégradées par les pluies d'hiver (faciès F2, rugosité 3 à 4). Pour le colza, les valeurs ont été diminuées car les observations de terrain ont montré une moins grande sensibilité. Pour les cultures tardives de printemps, les valeurs ont été abaissées par rapport au modèle de O. Cerdan (2001). Afin de tenir compte de l'évolution de la surface sous l'effet des pluies de forte intensité, la capacité d'infiltration du maïs a été ramenée à 2 $mm.h^{-1}$ (faciès F2, rugosité inférieure à 1 cm), contre une capacité estimée à 10 $mm.h^{-1}$. Une capacité d'infiltration de 50 $mm.h^{-1}$ (Delahaye, 1990 ; Lecomte, 1999) est attribuée aux prairies ainsi qu'aux bois, les observations de terrain ayant confirmé la parenté des comportements.

Occupation du sol	Pluie d'imbibition (mm)	Capacité d'infiltration ($mm.h^{-1}$)
Blé / Escourgeon / Avoine	5 mm	5 $mm.h^{-1}$
Colza	10 mm	10 $mm.h^{-1}$
Pois fourrager et lin	5 mm	5 $mm.h^{-1}$
Mais / Betterave / Pomme de terre	8 mm	2 $mm.h^{-1}$
Prairie	15 mm	50 $mm.h^{-1}$
Bois	15 mm	50 $mm.h^{-1}$
Habitat	5 mm	5 $mm.h^{-1}$

Tab. 10.3. Capacités d'infiltration et pluies d'imbibition ajustées au 16 juin 1997 (Delahaye, 2002).

	Estimations (modèle GR4 H) du Cemagref			Résultats des simulations obtenus avec RuiCells			
	Points de mesure	Volumes estimés (en milliers de m3)	Taille du bassin (ha)	Points de mesure *	**A** - Volumes avec les coef. de ruissellement	**B** - Volumes avec les capacités d'infiltration	Ecarts entre A et B (%)
St Martin	point 1	129 - 185	340	point 4	114 000	101 000	- 11 %
	point 2	163 - 240	745	point 2	151 000	153 000	+ 1 %
	point 3	175 - 277	1430	point 0	189 000	180 000	- 5 %

Document réalisé par J.Douvinet

	Estimations (modèle GR4 H) du Cemagref			Résultats des simulations obtenus avec RuiCells			
	Points de mesure	Volumes estimés (en milliers de m3)	Taille du bassin (ha)	Points de mesure *	**A** - Volumes avec les coef. de ruissellement	**B** - Volumes avec les capacités d'infiltration	(**B** / **A**) %
Villers-Ecalles	point 1	55 - 92	558	point 2	80 000	92 000	+ 15 %
	point 2	148 - 287	962	point 1	152 000	191 000	+ 25 %
	point 3	148 - 369	1442	point 0	225 000	270 000	+ 20 %

* Les points de mesure (identiques dans les deux cas) font référence aux précédents points utilisés dans la partie III

Tab. 10.4. Comparaison entre les simulations obtenues à partir des coefficients de ruissellement ou les hauteurs d'imbibition et les capacités d'infiltration sur les bassins de St-Martin et Villers.

Les ajustements entre les différents types de cultures ont, de toute façon, peu d'incidence sur le résultat final. Le volume écoulé dépend principalement de la distribution de quelques types d'occupation du sol : le blé, le maïs, les prairies, les bois et les zones bâties.

Les cartes identifient rapidement les mêmes axes d'écoulement et les mêmes zones de production du ruissellement. Les valeurs obtenues avec les capacités d'infiltration sont aussi comprises dans les intervalles de confiance fixés par la modélisation hydraulique à travers le modèle *GR4 H*. Les écarts sont faibles sur St-Martin (180 000 m^3 contre 189 000 m^3) mais ils deviennent plus importants sur Villers-Ecalles (270 000 m^3 contre 225 000 m^3). Les écarts sont de + 20 % à l'exutoire et + 25 % dans la partie intermédiaire (tab. 10.3.) de ce bassin, alors qu'ils varient, sur le bassin de St-Martin, de - 11 % en amont et - 5 % à l'exutoire.

Les capacités d'infiltration semblent ainsi estimer un volume de ruissellement plus élevé sur le bassin de Villers–Ecalles. Cette observation peut, en partie, s'expliquer par le rôle accru donné aux surfaces cultivées, plus nombreuses que sur St-Martin. Les parcelles de maïs sont également très contributives au ruissellement vu la faible infiltrabilité accordée à ces surfaces.

10.3.3. Interactions entre les zones de production à travers les échelles : une dynamique spatiale « *complexe* »

Une fois ces simulations testées et confrontées à des observations de terrain, une dernière étude porte sur le seuil de réactivité sur deux bassins versants présentant des caractéristiques différentes. L'objectif de ce travail, qui est purement expérimental, est de **quantifier un seuil** de fonctionnement en jouant sur les intensités des pluies. On garde les capacités d'infiltration précédentes, en postulant que ces surfaces sont déjà dégradées par des pluies antécédentes.

Une première simulation est proposée sur le bassin versant de St-Martin-de-Boscherville. Pour une pluie régulière de 4 mm sur une 1 h (décomposée en 1 mm toutes les 15 mn), les cultures de maïs sont rapidement identifiées car l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration y apparaît lorsque les pluies excèdent 2 $mm.h^{-1}$ (tab. 10.3.). Les ruissellements apparaissent sur certaines parcelles puis ils se propagent vers l'aval : soit ils se concentrent entre eux, soit ils traversent des cultures sarclées qui sont à la limite de la saturation. En revanche, les ruissellements disparaissent dès qu'ils circulent sur des surfaces (prairies, bois) où la capacité d'infiltration dépasse très largement l'intensité des pluies (fig. 10.9a.).

Une pluie de 8 mm en 1 h (décomposées en 2 mm toutes les 15 minutes) engendre **plus de ruissellement** en faisant fonctionner toute la partie amont du bassin. Les ruissellements issus des cultures sarclées se joignent à ceux issus des parcelles cultivées en maïs (fig. 10.9a.). La réaction est quasiment immédiate car ces surfaces cultivées ont une capacité d'infiltration très faible. Les volumes cumulés sont élevés (2 786 m^3 au point 2, contre 123 m^3 à l'exutoire pour une pluie de 4 mm). **La partie aval, boisée et enherbée, réinfiltre la quasi totalité des volumes produits depuis l'amont** (221 m^3, soit ~ 8% du volume estimé au point 2).

Il convient de préciser que **les légendes des deux cartes sont ajustées aux simulations.** Si on rapporte le même code couleur aux deux simulations, les ruissellements produits par une pluie de 4 mm sont quasiment invisibles, tant les différences sont importantes (fig. 10.9.).

En jouant sur les seuils d'intensité des pluies, on observe qu'une pluie de 12 mm en 1 h est nécessaire pour que le bassin fonctionne dans sa globalité. Il faut, en revanche, une pluie

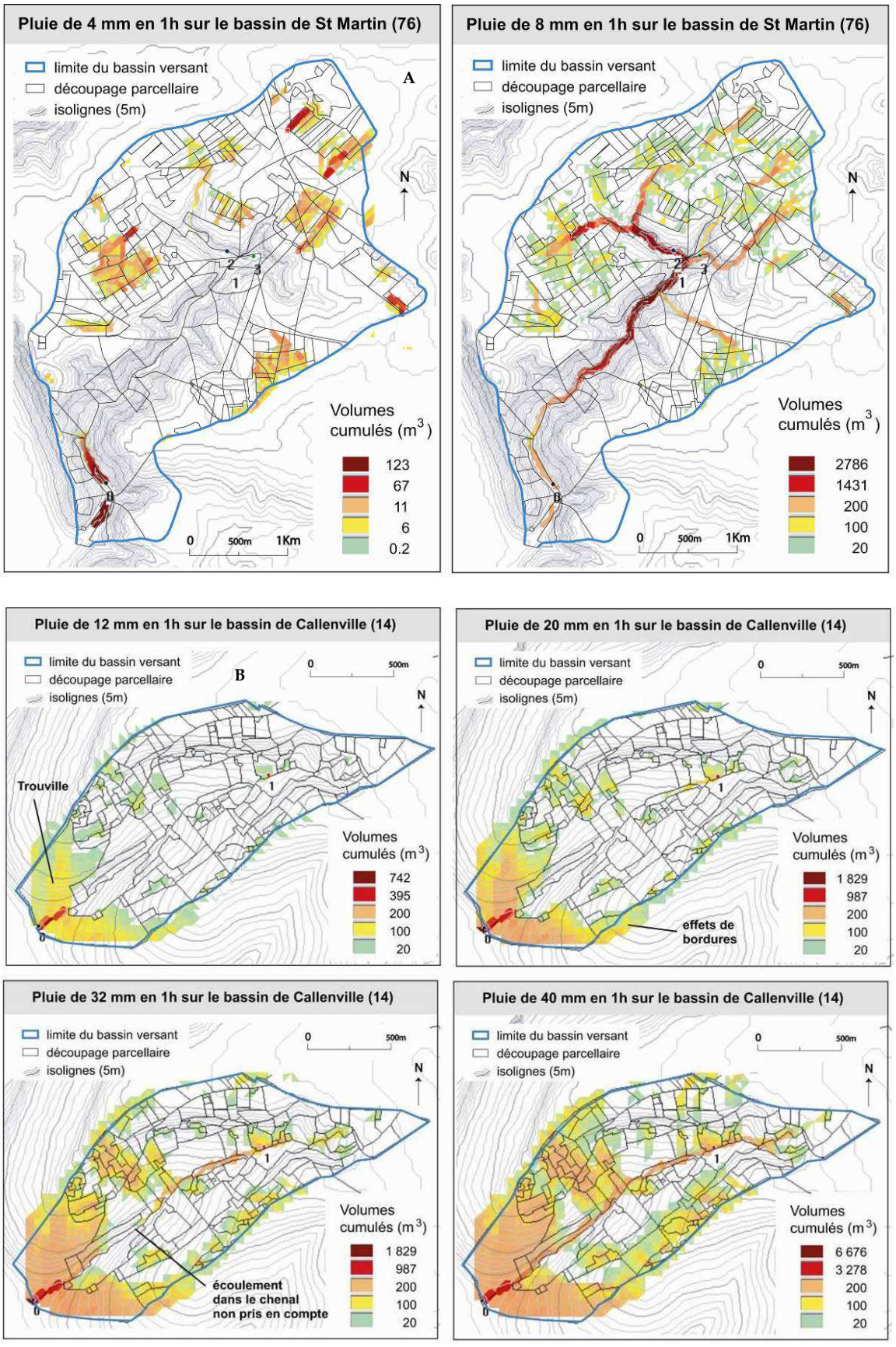


Fig. 10.9. Zones de départ du ruissellement pour deux types de pluies sur le bassin de St Martin (A) et Callenville (B). Les capacités d'infiltration ne changent pas entre les deux simulations : le but ici est de détecter les espaces de production en jouant uniquement sur l'intensité des pluies.

de 16 mm en 1h pour que les ruissellements mesurés à l'exutoire soient conséquents. **Cette étude met donc en avant des seuils de fonctionnement qui peuvent être différents suivant l'échelle d'observation (échelle locale, échelle globale) à laquelle on se place** (fig. 10.9a.).

Une seconde simulation est proposée sur le bassin de Callenville (fig. 10.9b.). Le seuil de fonctionnement est beaucoup plus élevé car les surfaces réinfiltrantes sont majoritaires. Cette observation confirme des résultats obtenus dans le chapitre 6. Une pluie de 12 mm en 1 h fait uniquement réagir la partie aval du bassin qui est fortement urbanisée. Les terres cultivées peuvent produire ponctuellement du ruissellement, mais ce dernier est aussitôt réinfiltré par les surfaces situées très tôt en aval. Une pluie de 40 mm en 1 h est nécessaire pour observer un fonctionnement généralisé sur l'ensemble du bassin versant (fig. 10.9.).

Les simulations testées sur ces deux bassins matérialisent les **effets de seuil** qui existent à différentes échelles. Les seuils de fonctionnement varient en fonction des caractéristiques des bassins versants qui sont **sensibles** aux conditions initiales : en changeant un des paramètres (l'intensité des pluies ou la distribution de l'occupation du sol), on peut passer d'un stade de ruissellement localisé à un fonctionnement généralisé qui aboutit à l'exutoire. Il faut toutefois rester prudent sur ces résultats qui considèrent les situations initiales comme dégradées.

Conclusions du chapitre 10

L'automate permet ici de mieux appréhender l'importance des interrelations verticales et horizontales qui conditionnent la dynamique d'un bassin versant. Les simulations mettent en évidence les **interactions** entre les différentes composantes de l'hydrosystème. Les effets liés au système morphologique et à l'agencement spatial des surfaces sensibles au ruissellement sont progressivement évalués. En intégrant les autres composantes environnementales, il est également possible de proposer, à partir de données simples, une **cartographie** des axes des écoulements en tout point de l'espace, de la parcelle agricole à l'exutoire final du bassin. Si le chapitre 6 avait déjà souligné une disparité des seuils de fonctionnement sur les 189 bassins versants, les simulations apportent une réponse **dynamique** et **continue** sur cette variabilité.

Les simulations soulignent toute l'importance de la **coexistence spatiale** entre les zones morphologiquement efficaces et les zones émettrices de ruissellement. La partie amont du bassin de St-Martin-de-B. est de nouveau mise en avant. Elle est efficace d'un point de vue structurel, et très sensible au niveau de son occupation du sol puisque les surfaces cultivées dominent majoritairement sur les parties planes du plateau qui se raccordent aux têtes des talwegs secondaires. Une fois concentrés, les écoulements n'ont plus qu'à dévaler le fond du vallon principal et ce, quelle que soit la nature de l'occupation du sol. La part des surfaces cultivées sur Villers compense, en revanche, un système morphologique moins réactif.

Les simulations permettent également de révéler **les jeux d'échelles** qui existent entre les zones de production (échelles locales) et les points de mesures (exutoires des bassins et sous bassins). Le ruissellement produit à une échelle locale n'atteint pas forcément l'exutoire final.

Des effets de seuil sont détectés sur les différents bassins étudiés ; ils sont également variables suivant l'échelle d'analyse à laquelle on se place. Une pluie de 8 mm en 1h suffit à faire fonctionner la partie amont de St Martin ; il faut une pluie de 16 mm en 1h pour que le bassin versant réagisse dans sa totalité ; sur le bassin de Callenville, une pluie de 40 mm est nécessaire pour que les écoulements se concentrent dans le fond du talweg principal.

Ces valeurs seuils doivent être utilisées avec précaution car les conditions initiales sont expérimentales. Les simulations offrent toutefois l'avantage d'**alimenter la réflexion** autour **des jeux d'échelles entre la production du ruissellement à un niveau micro (parcelle) et à un niveau supérieur (bassin versant). L'apparition des « *crues rapides* » est un phénomène émergent à l'échelle globale, mais ce sont la multitude des interactions locales et les relais de processus entre ces deux échelles qui en sont à l'origine.**

Les ambitions de ce projet et ses retombées dépassent finalement le simple cadre de la simulation des interactions spatiales. Si la finalité première est ici de mettre en évidence les interactions entre la morphologie et les autres composantes environnementales, la réflexion théorique, le cadre méthodologique et la démarche systémique sont également au cœur de ce travail. A moyen terme, il semble nécessaire de poursuivre vers les orientations suivantes :

1 - simuler pour comprendre :

L'outil de simulation permet aux chercheurs d'avoir une démarche exploratoire où ils peuvent tout tester, leurs hypothèses, des scénarii, mais aussi des situations « *extrêmes* ». Un des aspects fondamentaux de la simulation/modélisation réside dans la formulation des hypothèses de départ. L'automate permet de tester des hypothèses qui reposent sur des intuitions ou des observations empiriques. **Il existe un jeu de va-et-vient incessant entre les questions et les réponses apportées par les simulations.**

2 - simuler pour gérer :

La localisation des surfaces ruisselantes et leur lien avec les axes d'écoulement est de première importance, ce qui fait de *RuiCells* un outil de discussion entre les acteurs locaux en vue de réduire le risque de ruissellement sur les zones amont (Gaillard, 2005). Les cartographies des écoulements réalisées en tout point de l'espace permettent surtout de localiser les zones sources, et donc de cibler les espaces sur lesquels des interventions seraient éventuellement souhaitées afin de limiter la production du ruissellement. Dans une étude portant sur des problèmes de ruissellements hivernaux, D. Gaillard *et al*. (2008) montrent qu'en changeant la nature de l'occupation du sol de quelques parcelles, situées sur les axes d'écoulement, les volumes ruisselés sont plus faibles (fig. 10.10.). En utilisant l'automate, on peut évaluer l'incidence d'une modification du paysage agricole, proposer différents aménagements de l'espace, tester l'influence des rotations culturales…

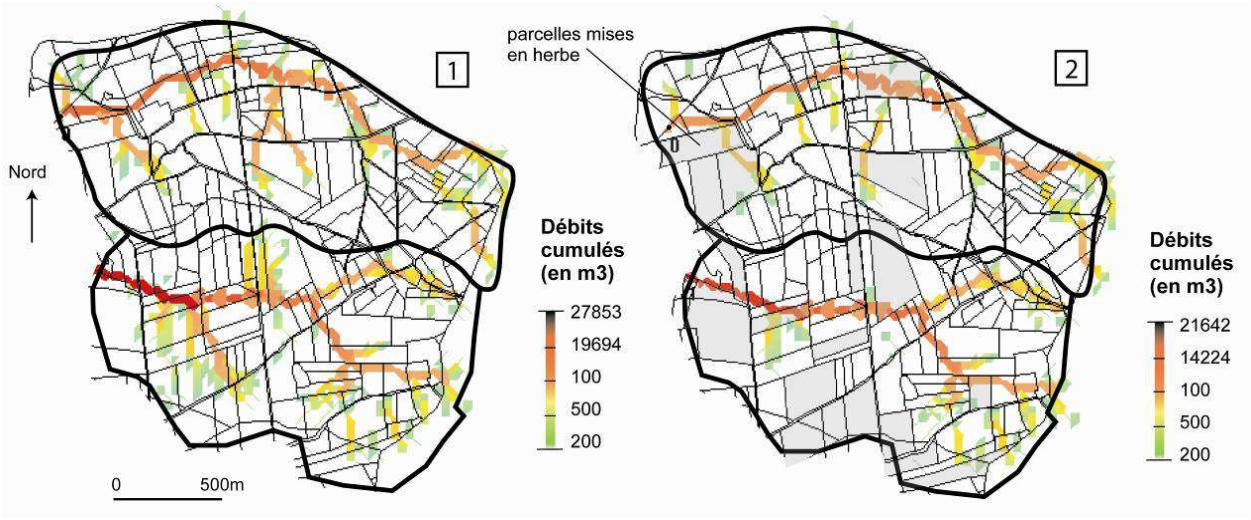


Fig. 10.10. Simulations du ruissellement : 1/ avec l'occupation du sol réelle (hiver 2006) ; 2/ intégrant des changements d'occupation du sol sur certaines parcelles.

3 - rester simple :

Il faut améliorer les résultats des simulations en intégrant, de manière incrémentale, tous les paramètres qui jouent un rôle sur la dynamique du ruissellement. La large gamme de modèles disponibles propose des systèmes, allant du très simple au très complexe. « *Ces analyses aboutissent à la conclusion convergente que les modèles simples, avec peu de paramètres, fournissent des résultats aussi satisfaisants que les modèles complexes* » (Perrin *et al.*, 2001). La course à la complexification ne doit pas faire perdre de vue le but principal de l'approche exploratoire : **la simulation doit rester un outil d'aide à la compréhension, et elle n'a pas pour vocation d'être aussi complexe que la réalité qu'elle tente de décrire.**

A **court terme**, il est envisagé de valider les simulations par automate à partir d'**un jeu de données plus vastes** et de se rapprocher des travaux développés par l'INRA. Il serait ainsi intéressant de comparer les résultats obtenus avec *RuiCells* par rapport au modèle STREAM (Souchère *et al.*, 2005). On pourrait également se focaliser sur des phénomènes printaniers et estivaux qui apparaissent dans d'autres régions de grande culture, et qui ont fait l'objet de modélisation, notamment avec le modèle LISEM. On pense, par exemple, à l'événement du 8 juin 1996 (69 mm en 24h, dont 49 mm en 30 minutes) qui a entraîné des inondations sur deux bassins situés dans le centre de la Belgique (Takken *et al.*, 1999 ; Beuselinck *et al.*, 2000).

Chapitre 11

Spatialisation des zones « *à risque* » à différentes échelles : essai de cartographie

Introduction	**p. 292**
11.1. Identification des zones « *à risque* » à l'échelle régionale	**p. 292**
11.2. Spatialisation du risque à échelle fine	**p. 299**
11.3. Vers la mise en place d'un « *diagnostic du risque* »	**p. 304**
Conclusions du chapitre 11	**p. 307**

Croisement des zones bâties et degré de pentes
Source : données SIG

Introduction

La spatialisation de l'aléa, des zones vulnérables, ou celles potentiellement inondées, est une nécessité pour mettre en place des documents réglementaires (Garry, 1995 ; Bocco *et al*., 2001 ; Masson *et al*., 2005). Le déclenchement d'inondations, répétées dans le temps et dans l'espace, amène souvent à la prévention d'un événement du même type et, en conséquence, à la cartographie de ce risque dans la perspective de la protection des biens et des personnes (Vinet, 2003 ; Veyret, 2003 ; Moriniaux, 2004). Toutefois, les travaux réalisés dans les régions du nord de la France se sont essentiellement intéressés aux inondations par débordements ou par remontées de nappe, et aux crues turbides hivernales (Topin, 2000 ; Laganier, 2002 ; Agasse, 2005). Très peu d'études ont ainsi été proposées pour spatialiser le risque « *crues rapides* » associées à des épisodes orageux en périodes printanière et estivale.

Ce chapitre a, dès lors, pour objet de répondre aux questions suivantes :

► quelle est la distribution spatiale des **vallons potentiellement sensibles à l'aléa** « *crues rapides* » ? En associant les espaces urbanisés, **quel est le niveau de risque induit ?**

► **l'indice d'efficacité structurelle** (indice IE), qui identifie un potentiel de concentration des écoulements, **peut-il être utilisé comme outil d'aide à la cartographie des zones « *à risque* » ?** Les zones identifiées comme très réactives correspondent-elles aux secteurs où les dégâts les plus importants ont été observés ? Afin de répondre à ces deux questions, il s'avère nécessaire de mener une **approche comparative** entre l'efficacité structurelle des bassins et les cartes des dommages recensés, sur des bassins où les indices IE sont élevés.

► **la méthode d'analyse est-elle transposable pour détecter les zones « *à risque* » dans n'importe quel bassin versant ?**

Tout au long de ce travail, la notion de risque se limite au croisement d'un aléa (« *crues rapides* »), identifié et spatialisé à partir de différentes caractéristiques morphologiques, et d'une exposition des enjeux (espaces bâtis) situés dans ces espaces « *à risque* ». Les dégâts qui peuvent affecter ces enjeux amènent à s'interroger sur leur vulnérabilité. La démarche retenue ici repose sur une étude à **trois niveaux d'observations** : une spatialisation des zones « *à risque* » à une **échelle régionale** (§ 11.1.) ; une analyse **à échelle fine** de la distribution des zones sinistrées en lien avec l'efficacité structurelle de plusieurs bassins (§ 11.2.), pour finir sur des « *diagnostics du risque* » sur des bassins non recensés à travers l'inventaire « *CatNat* ».

Cette étude doit fournir une **vue d'ensemble** des zones potentiellement touchées dans les régions du nord de la France, et **permettre d'affiner la spatialisation des espaces sensibles à échelle fine en utilisant les potentialités offertes par les simulations numériques.**

11.1. Identification des zones « *à risque* » à l'échelle régionale

11.1.1. Localisation des exutoires potentiellement sensibles à l'aléa

Une cartographie du risque est tout d'abord proposée à l'échelle régionale. Les chapitres précédents ont montré que la morphologie, à ce niveau d'observation, guide la distribution spatiale des bassins touchés par des « *crues rapides* » (cf. chapitre 5). Si l'inventaire proposé à

partir des dossiers « *CatNat* » considère l'événement comme coûteux et dommageable, et non comme le phénomène naturel, l'étude comparative sur les 189 bassins touchés (1983-2005) a néanmoins permis de dégager plusieurs caractéristiques. Les bassins du **type 2** (11 entités) sont volontairement exclus de cette analyse, car ils présentent des traits morphométriques et une efficacité structurelle interne particulière (cf. chapitre 9). On s'intéresse aux bassins qui présentent des caractéristiques communes au **type 1** (178 entités, soit 94 % de l'échantillon). Tous les exutoires de ces bassins « *sensibles* » répondent à trois critères (fig. 11.1.) :

- les vallons se situent en aval de grands bassins et ils présentent une dénivelée > à 50 m ;
- ils sont caractérisés par un saut de 2 ordres voire plus dans la classification de Strahler ;
- les versants encadrant le fond du vallon principal ont des pentes supérieures à 10 %.

En appliquant ces 3 requêtes, on identifie **2 540** vallons sur l'ensemble des départements étudiés, dont 167 correspondent à des bassins versants touchés (soit 94 % des entités incluses dans le type 1 ; fig. 11.1.). **La carte met en avant des secteurs géographiques** (Pays de Caux, Soissonnais, Artois) **qui correspondent à des zones sensibles déjà identifiées** (cf. chapitre 2). Ce résultat **conforte** encore un peu plus les résultats obtenus à partir des dossiers « *CatNat* ». La carte met aussi en évidence la **prédisposition d'autres secteurs** tels que le Pays d'Auge et la Thiérarche. Ces deux régions présentent une sensibilité tout aussi élevée d'un point de vue morphologique, ce qui rejoint, cette fois-ci, les observations faites dans le chapitre 5.

La carte montre une concentration des vallons sensibles à l'aléa le long des principales vallées humides et le long des plateaux à corniche. La densité des vallons augmente lorsque l'encaissement devient marqué dans le paysage. En revanche, ces bassins sont peu nombreux dans les vallées qui se raccordent avec les niveaux de base de manière régulière (Somme).

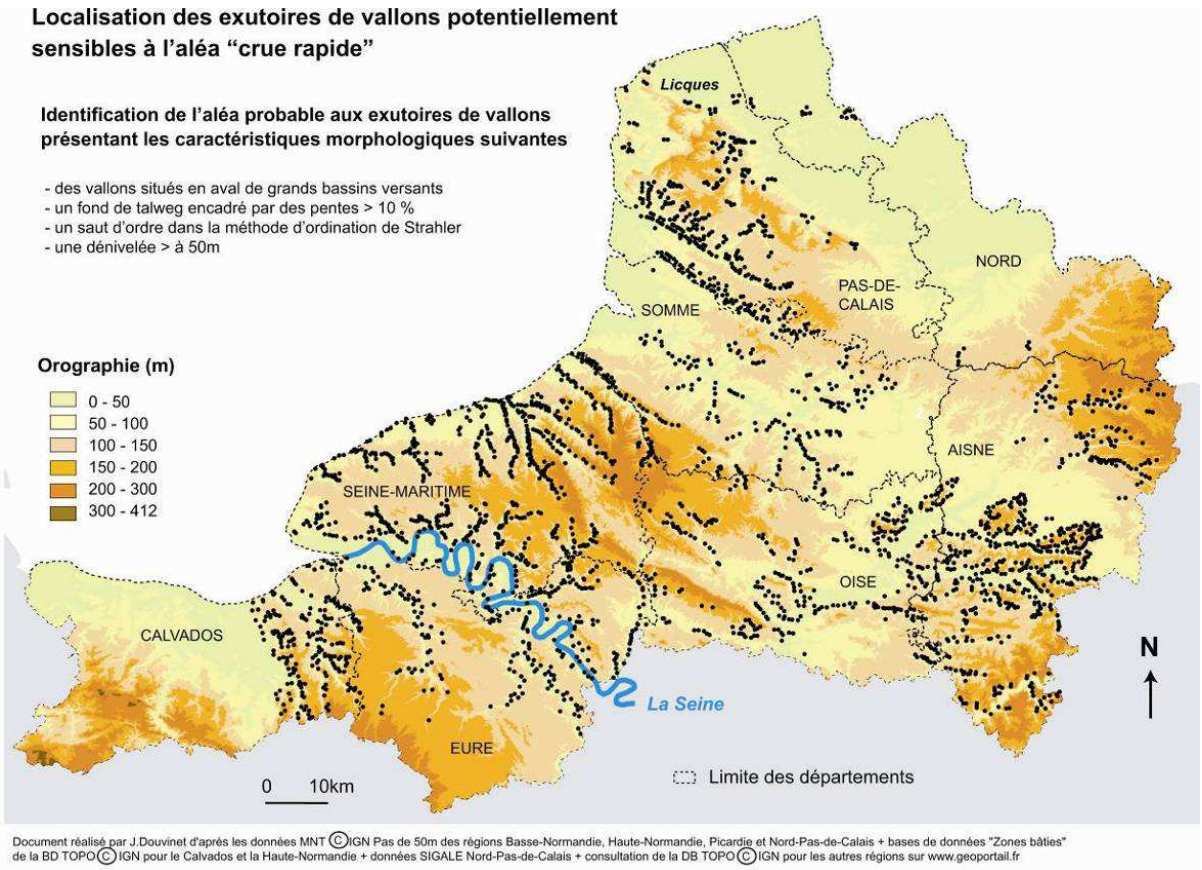


Fig. 11.1. Localisation des exutoires potentiellement sensibles à l'aléa « *crues rapides* ».

11.1.2. Croisement avec les enjeux

Une deuxième étape consiste à qualifier l'importance des zones urbanisées aux exutoires potentiellement sensibles à l'aléa, en se basant sur la couche d'informations « *zones bâties* » de la BD TOPO © IGN. On distingue les **exutoires peu urbanisés** (moins de 20 bâtiments) et les **exutoires densément peuplés**, où les habitations sont implantées dans tout le fond du vallon et où l'exposition est élevée. Le seuil de 20 maisons a été fixé de manière arbitraire ; c'est un premier « *seuil test* ». L'objectif de cette étude n'est pas de quantifier le coût des dommages potentiels (Manche, 1997 ; Bonnet, 2004 ; Puissant *et al.*, 2005), mais plutôt de spatialiser les exutoires les plus exposés aux phénomènes naturels probables.

La démarche est présentée, de manière détaillée, sur deux vallées humides localisées en Seine-Maritime (fig. 11.2.). La vallée de la Rançon (76) est faiblement urbanisée, à l'exception du dernier affluent (Fontenelle) situé en rive gauche où s'est installée la ville de Wandrille-Rançon. La partie basse de la vallée de l'Austreberthe est, en revanche, très exposée car les maisons sont nombreuses aux exutoires des vallons situés entre Duclair et Barentin. Certains bassins (Villers-Ecalles, St Paer) ont déjà fonctionné sur la période 1983-2005 (cf. chapitre 2).

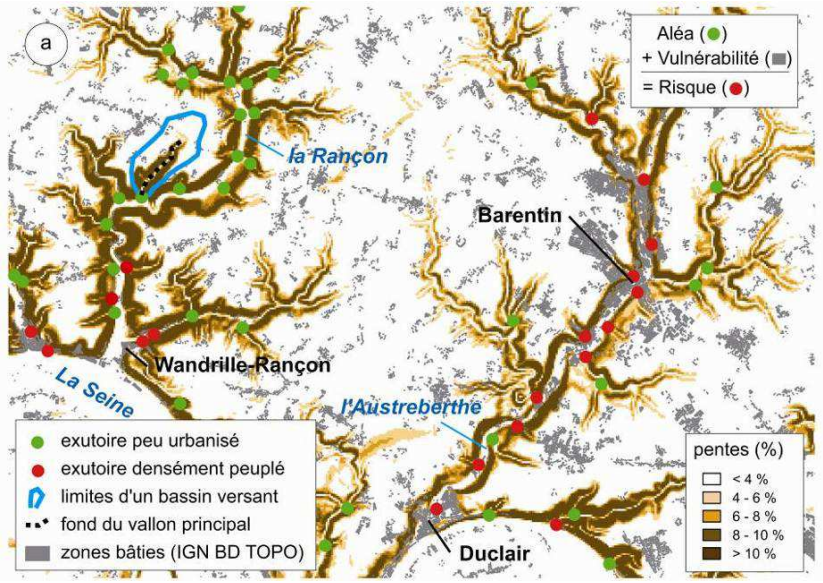


Fig. 11.2. Croisement entre l'aléa et les espaces bâtis pour définir le risque « *crues rapides* ».

Sur les **2 540 vallons**, **902** ont des exutoires fortement urbanisés, ce qui représente **35,5** % de l'échantillon. Le risque est très élevé dans les **parties aval de certaines vallées** (fig. 11.3.) : la Durdent, la Scie, l'Arques, la Ganzeville, la Bresle (76) ; l'Authie, la Canche, la Liane (62) ; l'Oise, la Marne, l'Aisne (02) ; la Troësne (60). Le manque de place, le maintien des terres agricoles sur les plateaux, l'inconstructibilité des zones inondables dans les basses vallées et la prédominance des forêts domaniales, peuvent, en partie, expliquer la pression foncière qui s'exerce sur les espaces environnants, et en particulier dans les talwegs des vallons « *secs* » (Angeliaume *et al.*, 1994 ; Delahaye, 2002). D'autres vallées présentent un nombre de vallons élevé, mais ils sont finalement peu urbanisés (Pays d'Auge, Soissonnais). **La sensibilité au risque est alors faible dans ces espaces.**

A la lecture de ces résultats, la densité de l'aléa et l'ampleur des enjeux doivent être croisées car elles jouent conjointement dans la caractérisation du risque final.

Fig. 11.3. Cartographie des exutoires, faiblement ou densément urbanisés, exposés à l'aléa « *crue rapide* » potentiel, et identifiés à partir de critères morphologiques.

11.1.3. Vers une cartographie du risque probable

Pour matérialiser ce **risque final**, une nouvelle carte est proposée (fig. 11.5.) en croisant la densité des vallons sensibles à l'aléa (par km²), représentée par des aplats de couleurs, et la densité des exutoires urbanisés (par km²), figurée en utilisant la méthode des isolignes. Les calculs de densité tiennent compte de la distance euclidienne, et non de l'alignement des vallons au sein des vallées humides (fig. 11.4.). Une forte sensibilité à l'aléa donne un risque élevé si les espaces urbanisés sont importants, mais seulement un risque faible si l'habitat est peu présent. On peut ainsi décomposer ce risque final en quatre catégories :

- **risque très faible** (Baie de la Somme, Santerre, Plateau picard, Lieuvin) ;
- **risque faible,** avec une forte sensibilité à l'aléa (Pays d'Auge, Soissonnais) ;
- **risque moyen,** avec des enjeux importants (Clermontois, Vexin normand, Noyonnais;
- **risque élevé**, avec un aléa important face aux enjeux exposés ; on retrouve bon nombre de vallées du Pays de Caux, du Pays de Montreuil et du Haut-Pays d'Artois (fig. 10.3.).

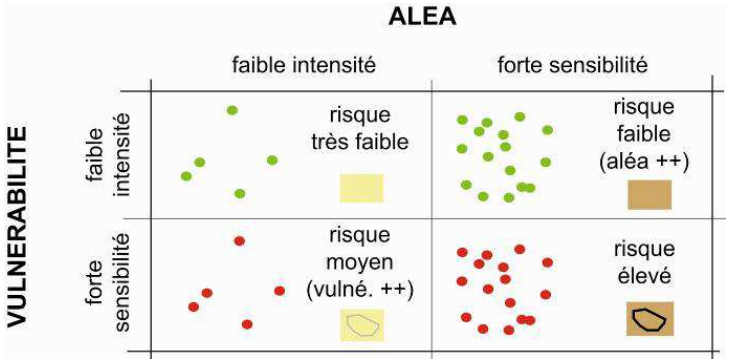


Fig. 11.4. Liens entre l'intensité de l'aléa et l'intensité de la vulnérabilité.

La carte (fig. 11.5.) confirme le rôle joué par la distribution spatiale des zones bâties sur la répartition des zones *« à risque »* à l'échelle régionale. Si le chapitre 5 avait déjà souligné cette relation à travers quelques études de cas, l'approche menée ici permet de spatialiser le risque sur l'ensemble de ces espaces. Les différences d'urbanisation entre les vallées sont clairement mises en avant. On observe également une **graduation du risque** en fonction de la position des bassins : plus un bassin se situe dans la partie aval d'un grand bassin, plus il risque d'être fortement urbanisé (Pays de Caux, Artois). Les secteurs où le risque est élevé (Dieppe, Lillebonne, Montreuil et Sissonne), ont été fréquemment touchés par des *« crues rapides »* au cours de la période 1983-2005. **Cette carte de sensibilité à l'échelle régionale rejoint donc les observations faites à partir de l'inventaire des bassins touchés (cf. chapitre 2).**

11.1.4. Liens avec les bassins versants touchés (1983-2005)

Parmi les **902 exutoires densément peuplés, 146 correspondent à des bassins touchés** au cours de la période 1983-2005, soit 16 % de l'échantillon. Le seuil fixé à 20 maisons était un premier *« seuil test »*. A **moyen terme**, il serait intéressant de faire varier ce seuil pour suivre l'évolution du rapport entre le nombre de vallons urbanisés, et le nombre de bassins touchés. Les autres bassins (13 %) ont des exutoires faiblement urbanisés (moins de 20 maisons), et la plupart des dommages ont été recensés au sein de ces bassins. **Ce constat amène à proposer une seconde étude, cette fois-ci à une échelle intra-bassin, pour affiner la carte du risque.**

Fig. 11.5. Croisement de l'aléa et les enjeux identifiant différents niveaux de risque.

11.2. Spatialisation du risque à échelle fine

Les simulations réalisées à partir de l'automate cellulaire *RuiCells* ont permis de définir l'efficacité hydrologique potentielle d'un bassin **en tout point de l'espace.** On propose alors d'utiliser cet outil d'analyse pour **mesurer, à une échelle intra-bassin, le degré d'exposition des espaces urbanisés face à un potentiel de concentration des écoulements de surface.**

11.2.1. Liens entre les indices IE et les zones sinistrées : retours d'expérience

Les cartes des indices IE (indice d'efficacité, cf. chapitre 9) permettent d'identifier tous les points en amont desquels la structuration des réseaux de talwegs est bien organisée au sein d'une forme donnée. Les simulations mettent ainsi en avant **tous les points de concentration où les écoulements peuvent devenir rapides et violents.**

Dans un premier temps, pour étudier la relation entre la localisation des dégâts observés et la carte des indices IE, on s'intéresse aux bassins où une cartographie des dommages a été réalisée de manière détaillée. Une première étude est tout d'abord proposée sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville. Très rapidement, et de manière surprenante, on remarque que les cellules où les valeurs IE sont les plus élevées spatialisent la même zone que celle qui a été la plus touchée lors du passage de la « *crue rapide* » du 16 juin 1997 (fig. 11.6.).

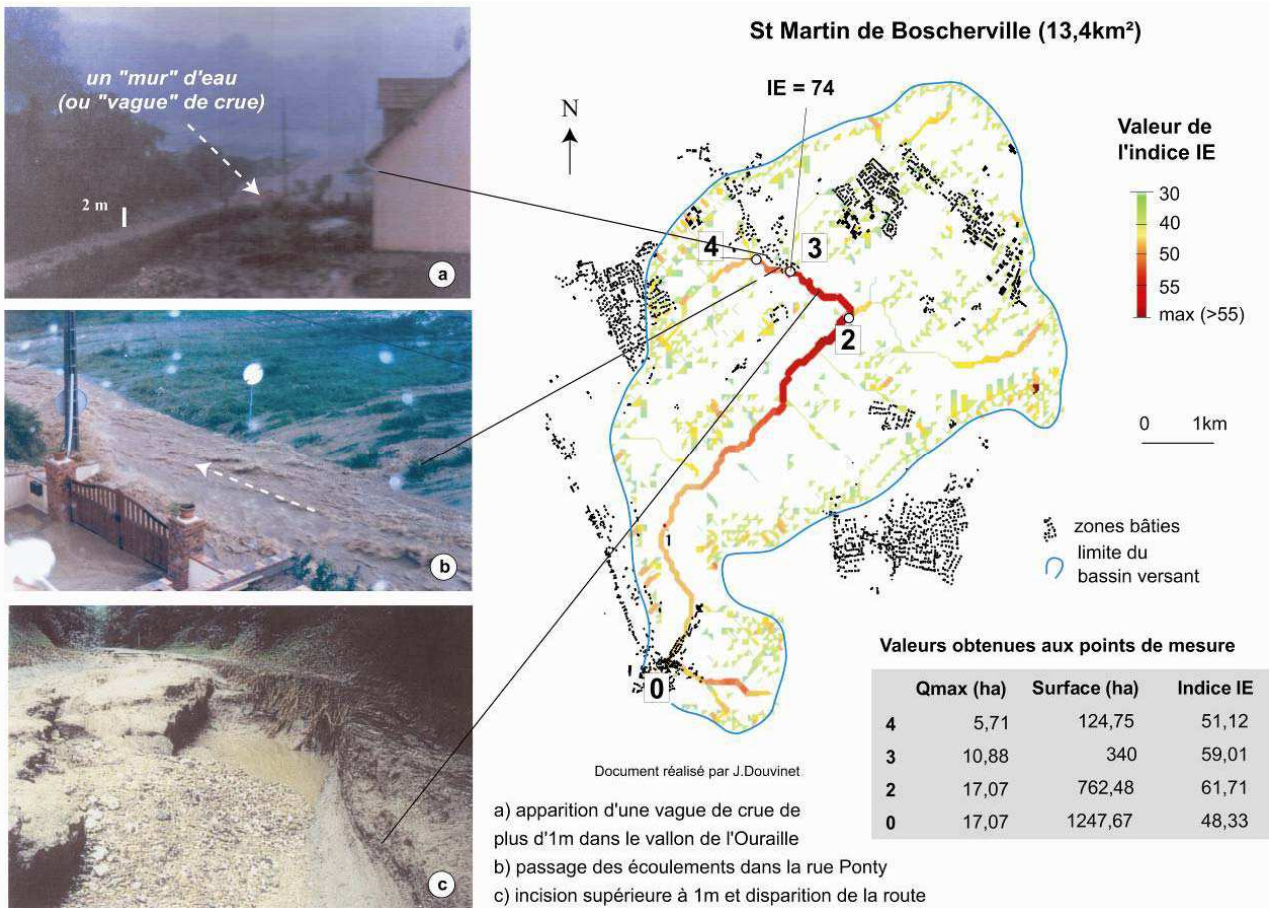


Fig. 11.6. Liens entre l'indice IE et les zones bâties sur le bassin de St-Martin (76).

Toute la section située entre les points 3 et 2 (là où les indices sont supérieurs à 50) a été entièrement détruite : route incisée, voitures emportées, matériaux charriés, etc. (fig. 11.6.). **La carte de l'indice IE est bien corrélée avec la localisation des dommages les plus importants.** L'efficacité structurelle a été aggravée par les contributions des surfaces cultivées situées en amont (cf. chapitre 10), et par le réseau routier qui collecte la totalité des écoulements tout en accentuant leur vitesse de propagation.

Les espaces urbanisés situés en amont du bassin (Vallon de l'Ouraille), sont directement exposés à cette efficacité structurelle. Plusieurs maisons sont en effet localisées sur des points où les indices IE sont élevés. Lors de la crue du 16 juin 1997, l'arrivée de la « *vague de boue* » a été observée dans cette partie amont, entraînant des dégâts matériels lourds (fig. 11.6a) et des pertes en vies humaines (3 personnes emportées). La comparaison entre la carte des indices IE et les zones bâties paraît suffisamment **pertinente** pour servir de support de localisation du risque à échelle fine. Ces espaces sont potentiellement les plus exposés à la concentration, rapide et violente, des écoulements de surface.

Il faut maintenant vérifier si cette relation est aussi observée sur d'autres bassins versants. Une deuxième étude est proposée sur le bassin d'Hautot-sur-Mer, touché par une crue le 28 juin 2005. Un inventaire exhaustif a été réalisé sur ce bassin, aboutissant à une cartographie détaillée des dégâts matériels et des impacts morphogéniques (cf. chapitre 1).

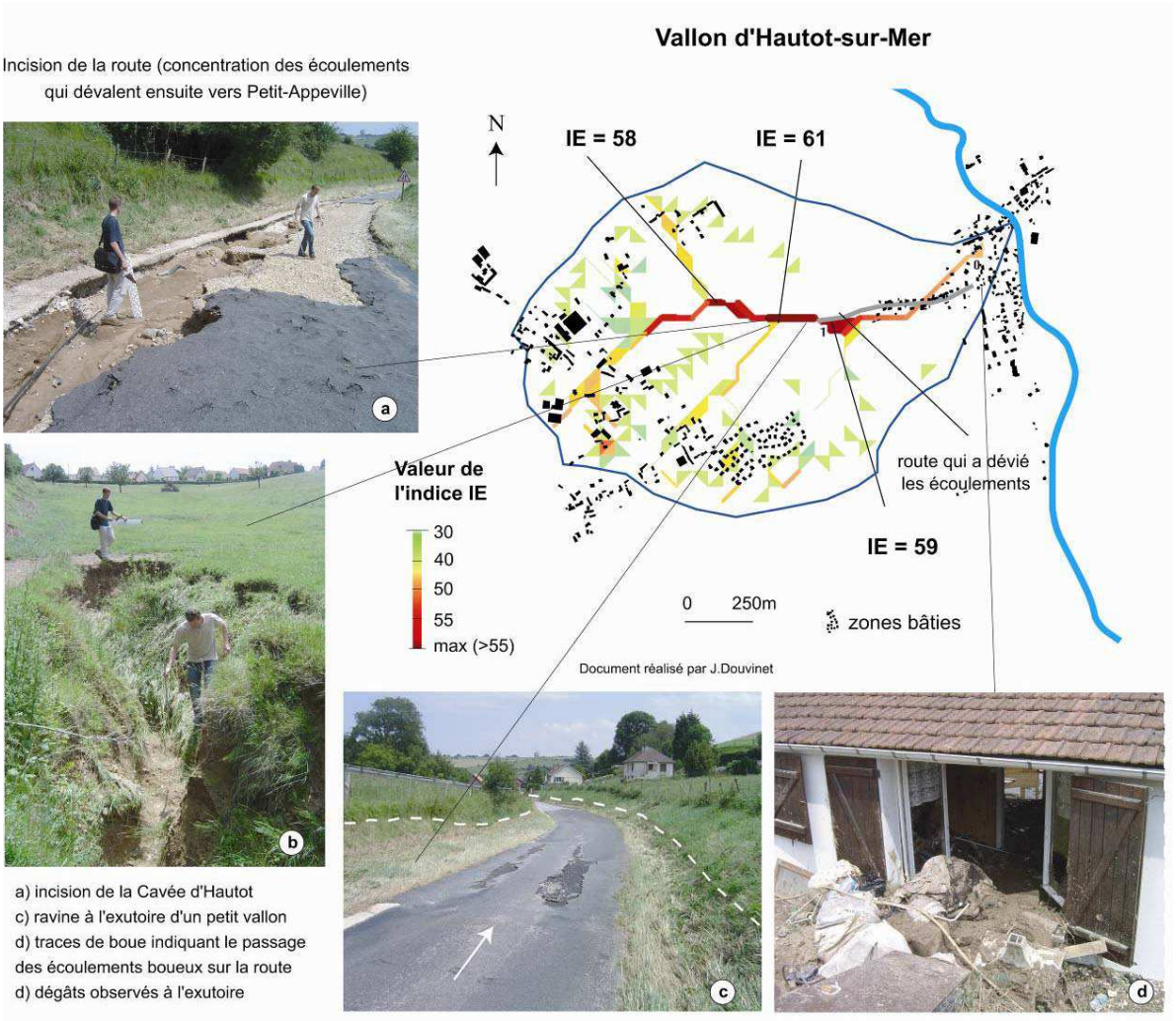


Fig. 11.7. Liens entre l'indice IE et les zones bâties sur le bassin d'Hautot-sur-Mer (76).

En comparant la localisation des principaux dommages avec la carte de l'indice IE, on se rend compte que **l'incision majeure** observée sur la Cavée d'Hautot (fig. 11.7a.) **se distingue facilement** puisque c'est à cet endroit que l'indice (IE = 61) est le plus élevé. Les autres points IE, notamment en amont du bassin, indiquent également une concentration des écoulements mais les incisions sont moins marquées car les surfaces enherbées ont joué un rôle protecteur face à la capacité érosive des écoulements. Dans la partie aval du bassin, la route a servi de relais entre la concentration du ruissellement (confluence) et l'exutoire (zones bâties).

Ces deux exemples prouvent donc que les indices IE les plus élevés sont identiques aux secteurs où les écoulements se sont concentrés de manière violente dans la réalité. En croisant cette information avec la distribution des espaces urbanisés, et donc potentiellement vulnérables, les cartes permettent également de retrouver les zones les plus sinistrées.

11.2.2. Diversité des configurations internes

D'autres simulations sont proposées pour mesurer l'exposition des zones bâties dans des bassins qui présentent différentes efficacités (homothétie interne, hyper-efficacité). L'analyse des dégâts occasionnés lors des « *crues rapides* » se base sur le contenu des dossiers « *CatNat* ».

Un premier secteur a été choisi près de Lillebonne (fig. 11.8.) Le bassin de la Fontaine Murée présente une structuration interne marquée, mais on remarque que les zones bâties se situent principalement dans la partie amont, donc en dehors de la zone où les écoulements se sont concentrés de manière importante (fig. 11.8a.). **Les dommages associés à l'aléa** (crue sur plus d'une dizaine de mètres de large dans le fond du vallon) **ont été peu coûteux pour les populations**, dans le sens où aucune habitation n'a été touchée car l'urbanisation est absente dans le fond de vallée. Les informations contenues dans les dossiers « *CatNat* » confirment néanmoins que le bassin a fonctionné dans sa totalité :

[« *La rue aux Cailloux (la bien nommée) a été détériorée et quelques maisons se situant sur les bas côtés ont été inondées. A Beuzevillette, le ruissellement des eaux a été terrible, emportant, même, le macadam des routes en certains endroits comme dans la rue aux Cailloux. Dans le bas de la vallée, vers la route de Bolbec-Lillebonne, un véritable torrent de montagne se déversait encore vers 22 heures ».*]

(*Le Quotidien* (76), édition du 10 juin 1993).

Le bassin du Puits Maillé présente également une **efficacité structurelle interne**, avec un indice IE élevé (IE= 66) dans sa partie amont. Les écoulements se sont rapidement concentrés lors de l'épisode pluvieux du 9 juin 1993 et des routes ont été partiellement détruites dans ce secteur. Un bassin de rétention a été aménagé pour réduire la contribution de ce sous bassin. Néanmoins, le risque est, là aussi, inexistant puisque aucune maison n'est implantée dans ce vallon. En revanche, **l'exposition** des zones urbanisées est forte **à l'exutoire final.** La plupart des dégâts ont été recensés dans cette partie aval du bassin (IE = 52) : 11 maisons totalement détruites, 191 maisons inondées, 133 véhicules endommagés, …etc.

Les autres bassins ne présentent pas des indices IE élevés. Les dégâts sont globalement mineurs. Sur le Val Horrible (fig. 11.8b.), trois maisons ont été inondées à l'exutoire du bassin. Sur le Val de la Fresnaye (fig. 11.8d.), les dégâts sont recensés en amont, sur le petit vallon du Val-des-Francs. L'absence de dommages importants pourrait, cette fois-ci, être associée à une absence d'indice IE élevé au sein de ces deux bassins.

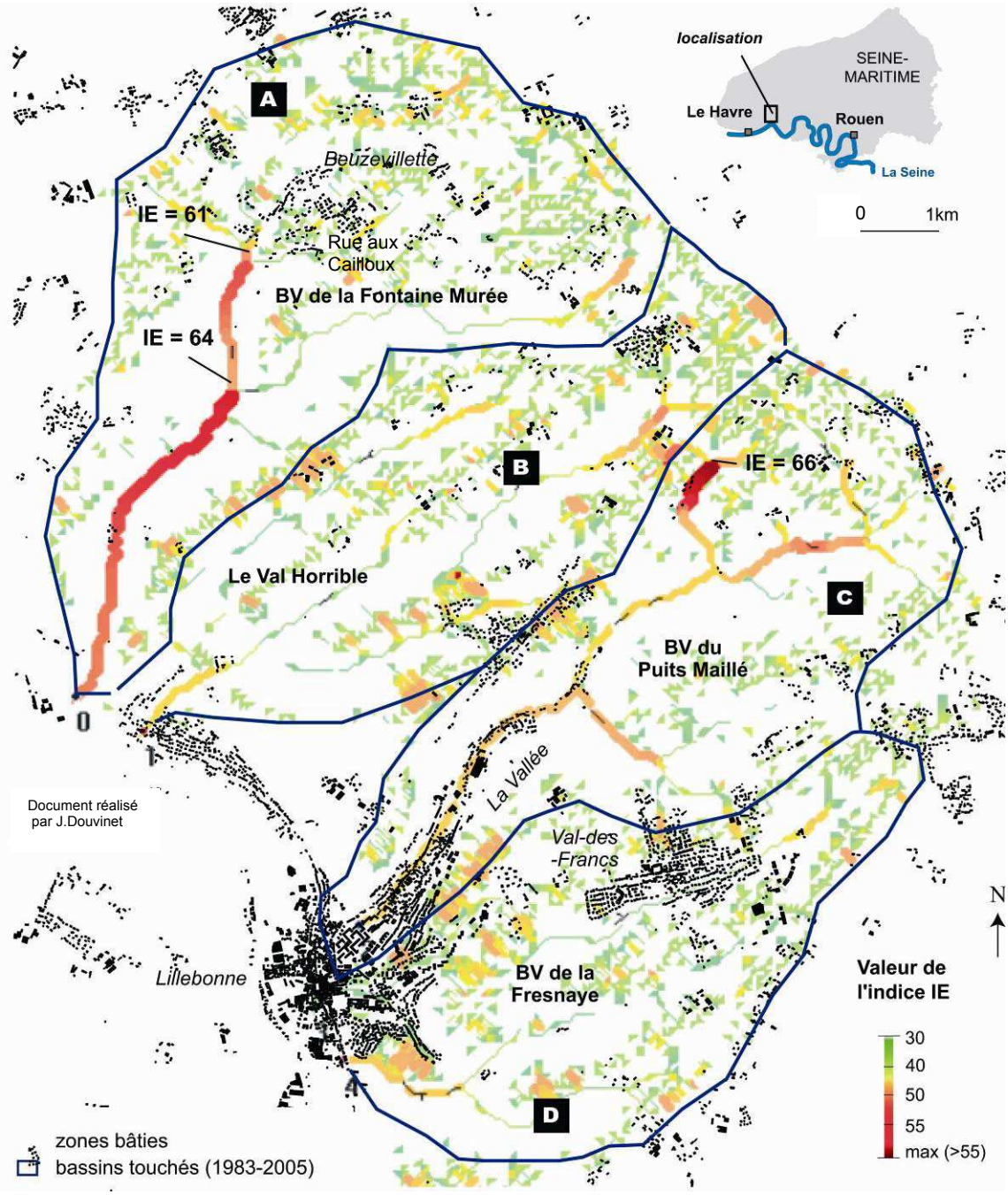


Fig. 11.8. Cartographie de l'indice IE et localisation des zones bâties sur différents bassins.

La partie amont de la Lézarde a ensuite été étudiée pour voir la relation entre les espaces urbanisés et l'homothétie interne de ce bassin (fig. 11.9.). Un point IE élevé se situe dans la partie amont du bassin (fig. 11.9.). On retrouve cette efficacité structurelle au point 1 (IE = 57), puis de manière continue jusqu'à l'exutoire. L'exposition des zones bâties à la concentration rapide des écoulements demeure faible en amont du bassin puisque les habitations se situent en dehors des axes de concentration. A l'exutoire, le risque devient plus élevé, avec quelques maisons situées directement dans le fond du vallon. Les dommages observés au cours des « *crues rapides* » déclarées (9 mai 2000, 15 juin 2001, 1er juin 2003) confirment une localisation des dégâts uniquement dans la partie aval. L'ampleur des dégâts reste toutefois minime, au regard du faible degré d'urbanisation à l'exutoire.

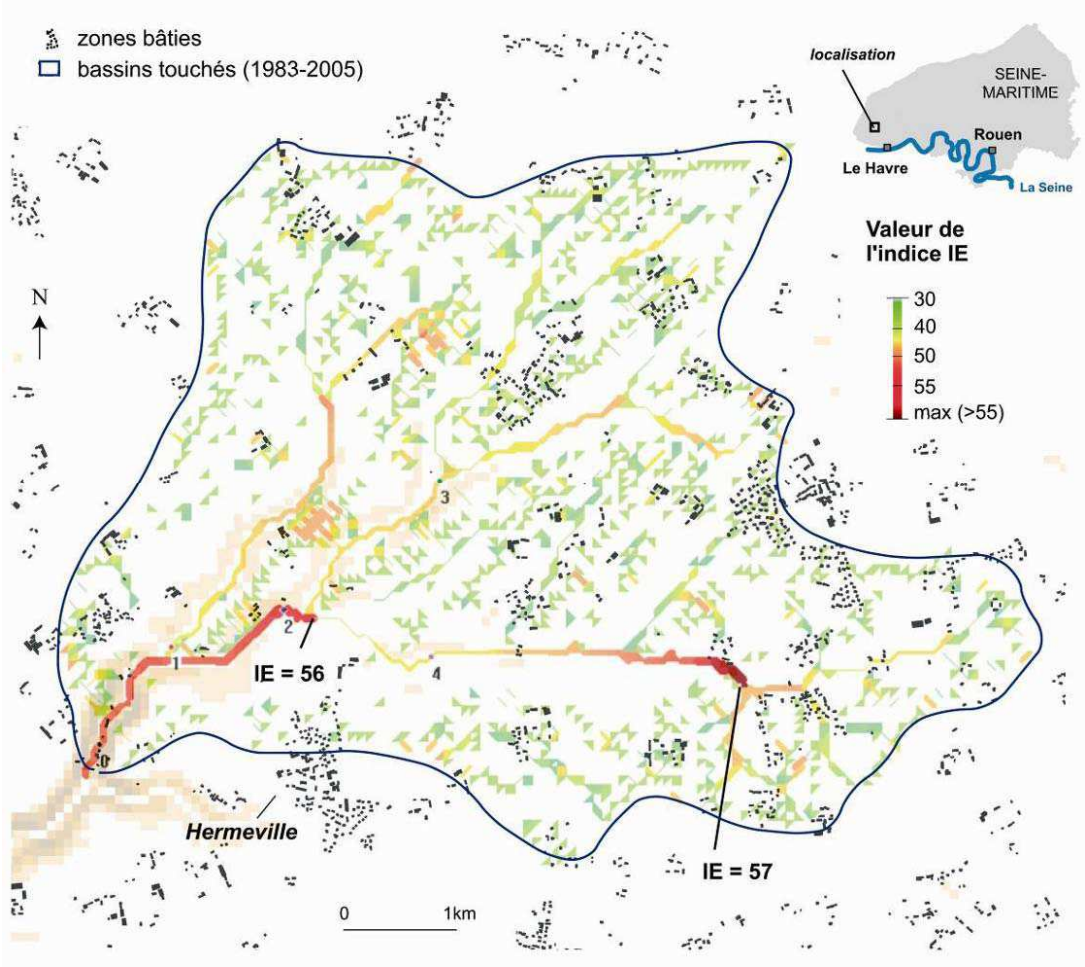


Fig. 11.9. Liens entre l'indice IE et les zones d'habitat en situation d'homothétie interne.

11.2.3. Discussion

Les cartes des indices IE permettent d'**affiner la spatialisation** des espaces « *à risque* » en identifiant **tous les points où les ruissellements peuvent se concentrer de manière rapide et violente.** Quand ces espaces sont urbanisés, les dommages observés sont « *catastrophiques* » : routes incisées, voitures emportées, éléments charriés. Quand ces espaces sont dépourvus de toute urbanisation, les dégâts se limitent aux infrastructures. N'affectant pas les espaces bâtis de manière directe, les détails mentionnés dans les dossiers « *CatNat*» sont finalement peu nombreux. La présence de l'aléa est néanmoins confirmée par les différents témoignages.

La **spatialisation** du risque doit évidemment être **complétée** en intégrant d'autres enjeux (Moriniaux, 2004), à la fois structurels (infrastructures et réseaux routiers) ou non structurels (profils socio-économiques des personnes exposées, mobilité des personnes en temps de crise, etc.). A moyen terme, l'aléa doit aussi être défini de manière plus précise, même si l'absence de données hydrométriques sur ces vallons (« *vallons secs* ») pose toujours problèmes.

Toutefois, en disposant de données simples (l'efficacité hydrologique potentielle d'un bassin et la localisation des zones bâties), il est possible de localiser des zones « *à risque* » en cas de pluies de forte intensité. Les cartes des indices IE constituent alors un bon outil d'investigation, et cette démarche peut être proposée sur d'autres bassins versants.

11.3. Vers la mise en place d'un « *diagnostic du risque* »

Des « *diagnostics du risque* » sont proposés sur des bassins versants « *non touchés* » par des « *crues rapides* » (1983-2005) pour deux raisons principales : **voir s'il existe des zones de forte concentration** sur des entités non recensées à travers l'inventaire « *CatNat* » (1983-2005), et porter un regard d'expert sur la sensibilité de ces confluences.

La région de Dieppe a été choisie comme **premier site d'exploration** ; ce secteur présente différentes configurations possibles (bassins se raccordant dans les vallées humides ; bassins côtiers) et plusieurs **bassins « *non touchés* »** se situent surtout à proximité de bassins touchés. **Deux points d'efficacité structurelle ressortent sur deux bassins qui n'ont pas été recensés au cours de l'inventaire « *CatNat* ».** Sur le bassin localisé près du littoral, l'efficacité est très marquée, avec un indice IE de 73. Le risque est inexistant puisque aucune habitation n'a été implantée dans le fond du « *vallon sec* » ; seule une route peut potentiellement présenter des dommages. Sur le bassin situé en rive droite de la Scie, le risque est bien plus important, et la commune de Petit-Appeville se trouve exposée des deux côtés de la vallée. Les autres bassins identifiés à l'échelle régionale ne présentent pas d'indices IE élevés. **Ces cartes confirment l'existence de confluences où les écoulements peuvent ponctuellement devenir importants sur d'autres bassins ; ce sont des espaces potentiellement « *sensibles* ».**

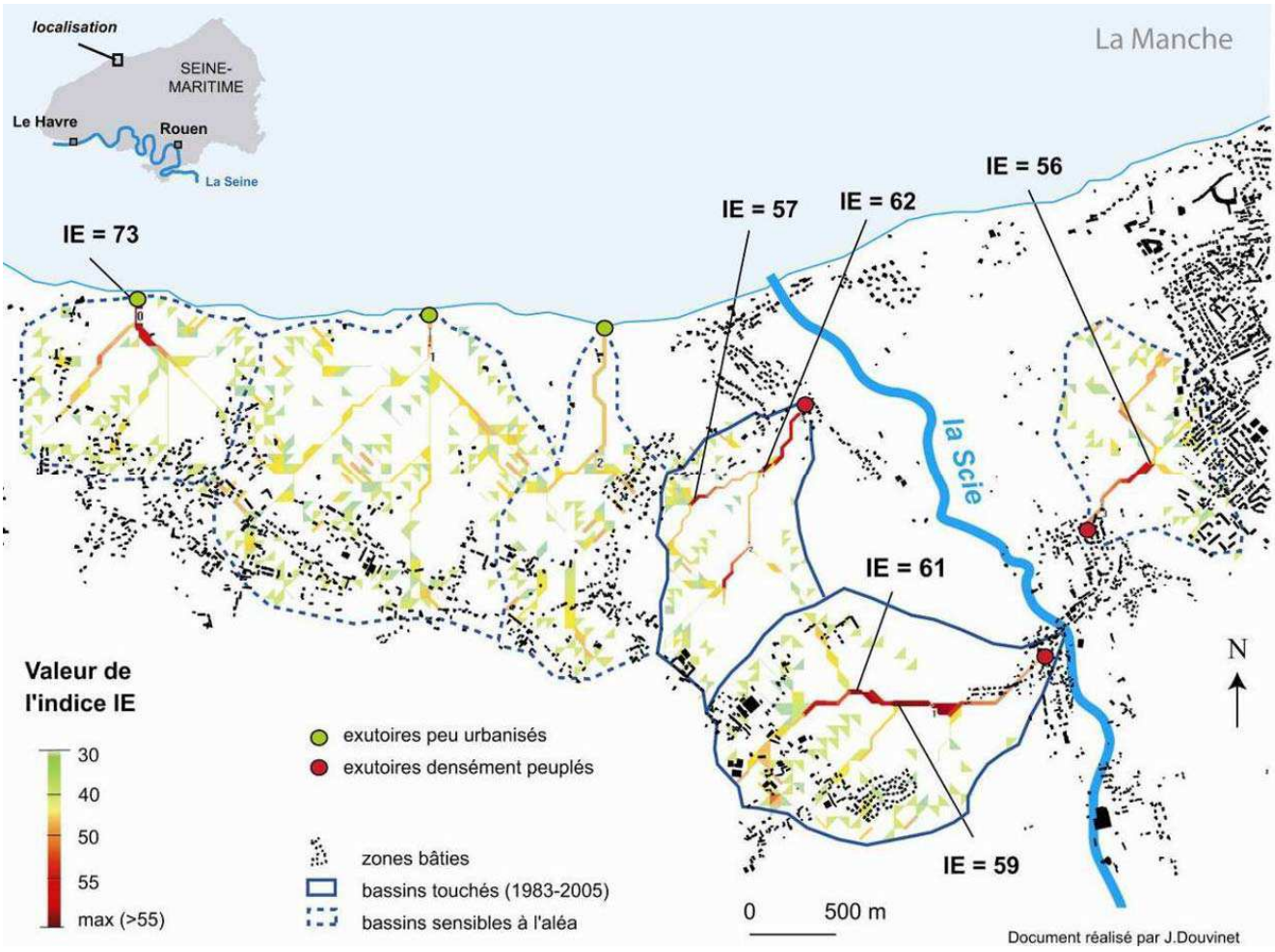


Fig. 11.10. Liens entre l'indice IE et les zones d'habitat : exemple à l'ouest de Dieppe (76).

La région de Grainville-la-Teinturière et la partie intermédiaire de la vallée de la Durdent ont également été étudiées. Les points IE élevés au sein du bassin de Oherville, identifié dans l'inventaire, concordent avec la localisation des principaux dommages. **Trois autres bassins présentent une forte efficacité structurelle interne** : Le Hanouard, le bassin de Sommesnil et le bassin d'Ourville (fig. 11.11.).

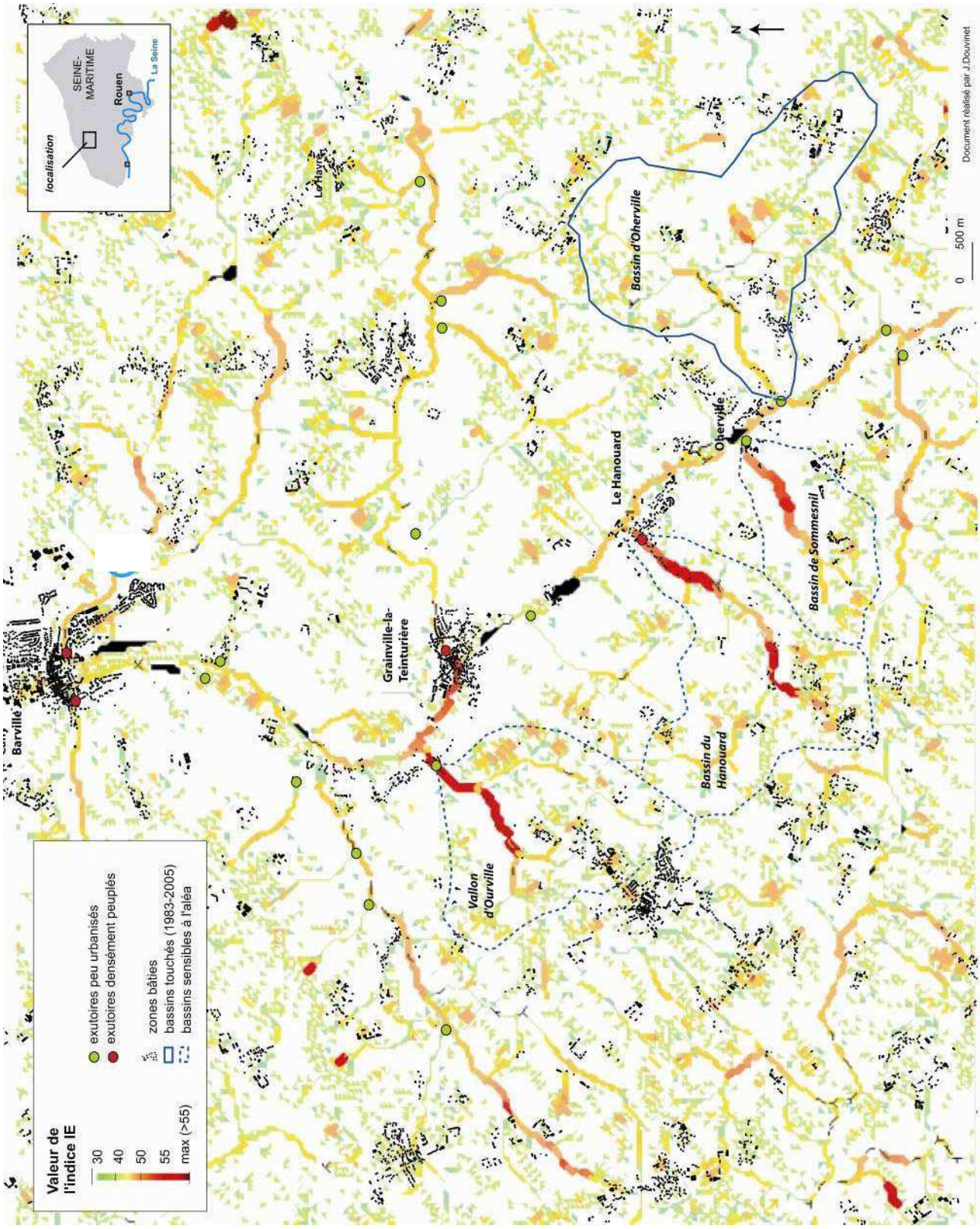


Fig. 11.11. Liens entre l'indice IE et les zones d'habitat dans la vallée de la Durdent (76).

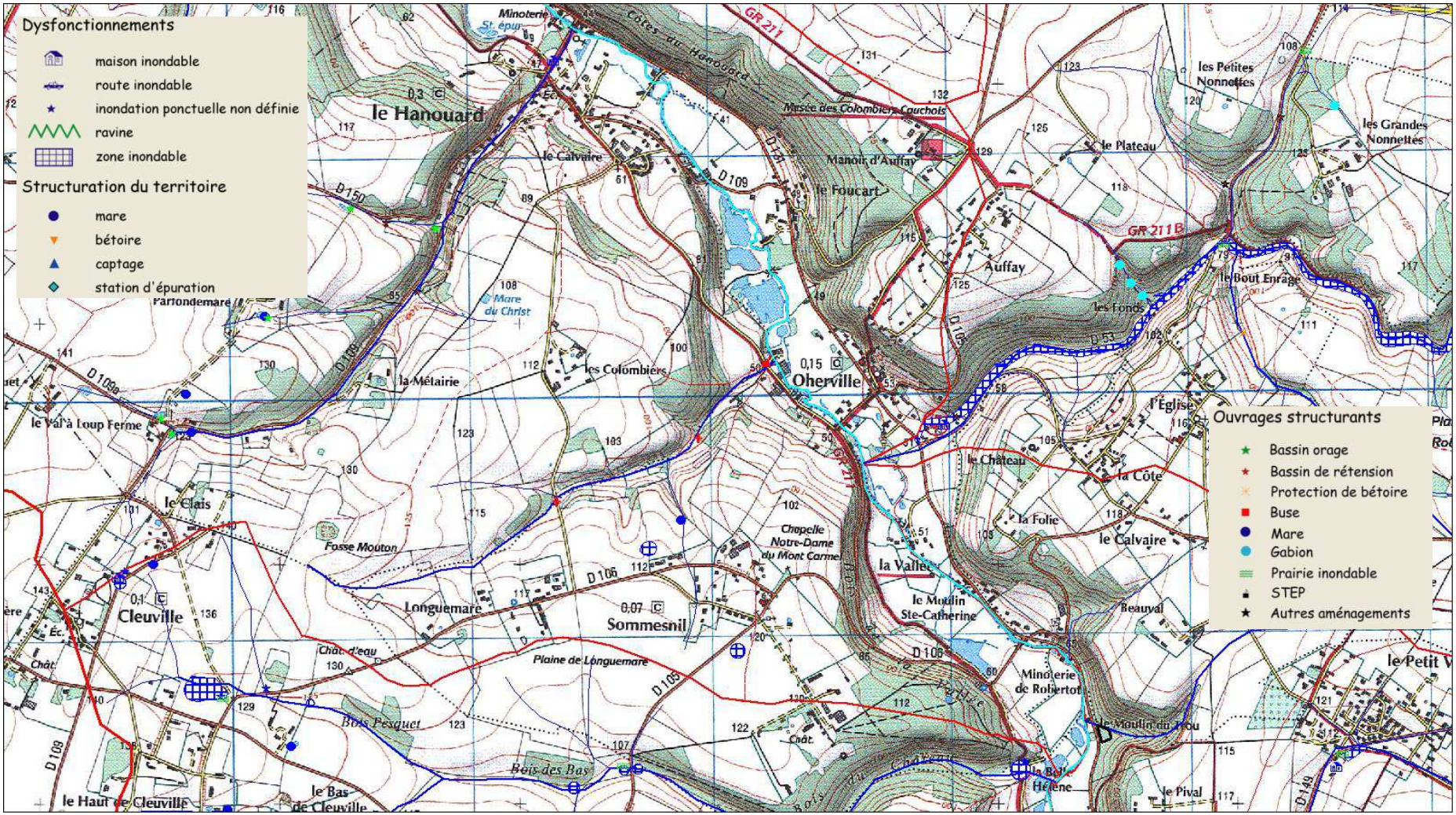


Fig. 11.12. Carte de localisation des aménagements (réalisés et en cours d'étude) sur les bassins de Sommesnil et du Hanouard (modifié d'après les données du SMBV de la Durdent, 2006).

A dire d'expert, ces cartes sont conformes à la connaissance du terrain car les indices IE identifient les secteurs où les écoulements apparaissent avec un temps de concentration très court (D. Pérelle, animateur du SMBV (*Syndicat Mixte de Bassin Versant*) de la Durdent, communication orale). Les dommages associés sur les trois bassins concernent uniquement les **réseaux routiers** : voiries inondées et dégradées, fossés éventrés, dépôts de limons, etc.. Ces bassins sont peu urbanisés (Ourville), ce qui pourrait expliquer l'absence de déclarations « *CatNat* » dans ces vallons.

Différents aménagements hydrauliques (bassins de retenue, diguettes) sont construits, ou en projet, aux points de concentration pour réduire l'efficacité structurelle des bassins. Dans ce cas-là, les « *points de forte énergie* » correspondent à des points « *sensibles* » connus et surtout pris en compte par les aménageurs du territoire. Il suffit de s'appuyer sur l'exemple du bassin de Sommesnil et du Hanouard pour voir que les aménagements sont effectivement placés aux zones identifiées par l'indice IE (fig. 11.12.).

Ces « *diagnostics du risque* » ouvrent plusieurs perspectives. Elles pourraient être utilisées par les gestionnaires du risque pour cibler les secteurs « *sensibles* ». L'analyse d'événements probables sert les intérêts des phases de gestion de crise et d'anticipation. Il serait également possible d'identifier toutes les surfaces en amont desquelles des aménagements (bassins de retenue, diguettes) pourraient être proposés pour atténuer la fonctionnalité hydrologique de ces surfaces. Dans la même optique, les simulations pourraient servir d'**outil de discussion pour gérer la concentration des écoulements au sein d'un bassin. La représentation de la concentration des écoulements de surface, en tout point de l'espace, pourrait permettre de gérer, voire diminuer, la vulnérabilité liée à la mobilité des personnes en temps de crise.**

Conclusions du chapitre 11

Cet **essai cartographique** propose finalement de multiplier les niveaux d'observation afin d'affiner la spatialisation des espaces « *sensibles* » aux « *crues rapides* ».

► Quelle est la distribution spatiale des vallons potentiellement sensibles à l'aléa « *crues rapides* » ? En associant les espaces urbanisés, quel est le niveau de risque induit ?

L'échelon régional fournit une vue d'ensemble des vallons sensibles à l'aléa en se basant uniquement sur des caractéristiques morphologiques communes aux bassins du **type 1** :

- **2 540** vallons sont identifiés comme potentiellement sensibles à l'aléa ;
- **902** bassins ont des exutoires fortement urbanisés (soit 35,5 % de l'échantillon) ;
- **146 vallons** font partie des bassins recensés par l'inventaire (1983-2005), soit 16 %.

La carte des exutoires sensibles à l'aléa confirme la prédisposition des régions déjà mises en avant par l'inventaire « *CatNat* » : le Pays de Caux, le Haut-Pays d'Artois, et le Soissonnais. **Le premier facteur de contrôle est donc bien la morphologie régionale.** En fonction de la localisation des zones bâties et des espaces urbanisés, les vallées ont différentes sensibilités. Le risque est concentré dans les parties basses des vallées humides du Pays de Caux, tandis que le risque est plus disparate dans le Soisonnais et la Haut-Pays-d'Artois. En choisissant d'identifier les exutoires et non les entités « *bassin versant* », on va au-delà des cartes réalisées à partir de requêtes spatiales (cf. chapitre 5) et on s'affranchit aussi de la taille des surfaces amont. Ces expérimentations méritent d'être poursuivies à moyen terme.

► L'indice d'efficacité structurelle (indice IE), qui indique un potentiel de concentration des écoulements, peut-il être utilisé comme outil d'aide à la cartographie ?

Les indices IE, qui identifient tous les points où les écoulements de surface peuvent se concentrer de manière rapide et violente, sont bien corrélés avec les zones où les sinistres ont été importants. Les cartes des dommages, réalisées à échelle fine sur les deux bassins de St-Martin et d'Hautot-sur-Mer, démontrent que la **relation est pertinente**. Les investigations menées sur des bassins versants « *non touchés* » par des « *crues rapides* » sur la période 1983-2005, confirment que des indices IE élevés sont aussi détectés ailleurs, et qu'ils sont associés à des zones où le temps de concentration des ruissellements est de courte durée.

On porte alors un regard d'expert sur la sensibilité de ces espaces face à un potentiel de concentration des écoulements de surface.

Parallèlement, ces indices spatialisent des secteurs « *à risque* » quand les zones urbanisées sont directement exposées à l'aléa. La plupart des zones, où les indices IE sont élevés, sont souvent dépourvues de toute urbanisation. Ainsi, l'aléa existe, mais les sinistres, affectant principalement les infrastructures, ne sont pas considérés comme « *dommageables* » pour les populations. Ce constat explique le fait que peu d'informations soient retrouvées à partir des dossiers « *CatNat* », qui tiennent uniquement compte de la « *sinistralité* » des inondations, soit les dégâts portant atteinte à la population (Pigeon, 2002).

► La méthode d'analyse est-elle transposable pour spatialiser les zones « *à risque* » dans n'importe quel bassin ?

Les simulations numériques offrent la possibilité de **combiner la dynamique potentielle d'un bassin versant (aléa théorique) à la localisation des surfaces urbanisées (enjeux) dans n'importe quel espace.** En utilisant des données simples, on peut ainsi détecter des secteurs potentiellement « *sensibles* ». Cette démarche est bien évidemment transposable sur d'autres bassins, et on pourrait tester l'automate sur des entités touchés par d'autres « *crues rapides* », notamment les crues torrentielles qui apparaissent dans le sud de la France (Lahousse, 1997 ; Gaume *et al.*, 2000 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005 ; Arnaud-Fassetta, 2007).

A court terme, cette approche mérite d'être poursuivie sur d'autres bassins, et confrontée à d'autres retours d'expérience. Il faudrait également ajouter d'autres paramètres physiques et humains (degré d'encaissement des bassins, occupation du sol, réseaux routiers), et tester cette relation sur les bassins du type 2 qui avaient volontairement été écartés dès le début de l'analyse.

Synthèse de la quatrième partie

Les travaux portant sur la structuration interne des bassins versants ont été poursuivis en intégrant progressivement les autres variables (physiques et humaines) qui régissent la dynamique hydrologique d'un bassin. Les différentes simulations, d'ordre expérimental, permettent de mieux localiser les zones « *sensibles* » à l'échelle des bassins versants.

► Vers une meilleure prise en compte des interactions spatiales

L'automate permet de mieux **évaluer l'importance des relations entre les composantes** qui conditionnent la dynamique d'un bassin versant. Les simulations offrent la possibilité de mesurer le poids de la morphologie, puis son rôle combiné avec la pluie et l'occupation du sol, et ce, de manière dynamique et continue en tout point de l'espace. Si le chapitre 6 avait déjà mis en évidence des seuils de fonctionnement différents suivant les bassins, l'automate permet de simuler les **conditions de passage de ces seuils.**

Les simulations soulignent toute l'importance de la **coexistence spatiale** entre les zones morphologiquement efficaces et les zones émettrices de ruissellement. De petites surfaces cultivées peuvent ainsi contribuer, de manière significative, aux « *crues rapides* ».

Les simulations permettent également de révéler **les jeux d'échelle**s qui existent entre les zones de production (échelles locales) et les exutoires (échelles globales). Les ruissellements produits à une échelle locale n'atteignent pas forcément l'exutoire final. Le bassin versant est donc bien animé par des processus d'émergence liés aux combinaisons entre la morphologie, la pluie et l'occupation du sol, qui permettent le passage de fonctionnements locaux, chroniques, à des fonctionnements généralisés exceptionnels.

► Vers une meilleure connaissance des espaces potentiellement « *à risque* »

La morphologie commande la distribution des bassins potentiellement réactifs à l'échelle régionale (type 1) et la répartition spatiale des populations joue ensuite sur la **localisation des secteurs « *à risque* ». La carte met en avant des secteurs géographiques** (Pays de Caux, Soissonnais, Artois) **qui correspondent à des zones sensibles déjà identifiées** (cf. chapitre 2).

Ce résultat **conforte** un peu plus les résultats obtenus à partir des dossiers « *CatNat* ». Les espaces sujets à l'aléa sont désormais connus. En combinant cette information (espaces de prédilection) avec la prévision de l'aléa pluviométrique, il serait en effet possible d'identifier des zones potentiellement réactives pour anticiper l'apparition des « *crues rapides* » probables.

A une échelle intra-bassin, les indices IE identifient tous les points où les écoulements de surface peuvent se concentrer de manière rapide et violente. Les connaissances terrain sont partielles car il existe peu de documents (retours d'expérience, cartes des dommages à échelle fine) afin de vérifier la pertinence de cette cartographie des indices IE. Toutefois, les

quelques exemples présentés ont montré que cet indice pouvait servir d'outil de diagnostic sur des bassins « *non touchés* » par des crues catastrophiques. La confrontation avec des dires d'experts donne des résultats encourageants.

Conclusion générale

Chéret (02) – 17 juin 1986
Source : dossiers « *CatNat* »

Dans la plupart des recherches menées sur les « *crues turbides* », l'entrée centrée sur la sensibilité du sol et sur l'évolution de l'occupation du sol a été privilégiée (Papy *et al.* 1988 ; Ludwig, 1992; Angeliaume, 1996 ; Cerdan, 1997 ; Meyer, 2001 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002). Les facteurs morphologiques, hydrogéologiques et climatiques ont été peu étudiés en raison de l'apparente **monotonie** du relief et de la trompeuse **douceur** du climat océanique réputé peu extrême. Les variables géomorphologiques étant souvent jugées **invariantes**, la genèse de ces crues, alimentées par du ruissellement érosif, ne pouvait s'expliquer que par la nature du sol, son occupation et les pratiques agricoles associées.

Néanmoins, deux types de phénomènes sont à dissocier : le système de crues turbides hivernales, où les liens avec l'occupation du sol, les états de surface et les antécédents hydroclimatiques sont évidents, et le système de crues turbides printanières et estivales, qui présente un fonctionnement original. Ce second système se caractérise par des écoulements de surface, de nature torrentielle, qui apparaissent à la suite de pluies de forte intensité sur des vallons souvent dépourvus d'écoulement pérenne (des « *vallons secs* »). La pluie redonne à la variable morphologique le premier rôle, et ce n'est plus l'organisation de l'occupation du sol qui est en jeu, mais bien l'organisation des formes au sein des bassins versants.

L'objectif principal de cette recherche était alors **double** : améliorer les connaissances sur le fonctionnement des « *crues rapides* » qui apparaissent en périodes printanière et estivale, et montrer comment l'organisation morphologique d'un bassin versant pouvait influencer sa réponse hydrologique, notamment à travers l'utilisation de nouvelles méthodes d'analyse spatiale, et en particulier les automates cellulaires.

Cette étude s'est concentrée plus spécifiquement sur huit départements du nord de la France. Ce choix se justifie par la volonté de travailler dans un espace (régions de plateaux) homogène d'un point de vue géologique (milieu sédimentaire) et dans lequel plusieurs types de configurations (occupation du sol, degré d'urbanisation, géomorphologie) sont possibles. L'échelle régionale devait aussi permettre d'avoir un nombre d'événements suffisamment importants pour étudier les facteurs déclenchants et prédisposants aux « *crues rapides* ».

Les résultats obtenus tout au long de ce travail soulignent à quel point l'analyse spatiale peut être un support d'investigation majeur pour aborder ces différentes questions.

► Spatialisation d'un risque original : les « *crues rapides* » du nord de la France

La première partie dresse **un état des connaissances** sur les « *crues rapides* » printanières et estivales qui ont un mode de fonctionnement bien particulier. **Ces crises hydrologiques se caractérisent par des écoulements torrentiels qui se manifestent aux exutoires urbanisés de bassins versants de petite taille. 70 % des 189 bassins recensés font moins de 10 km² et 50 % ont une superficie inférieure à 5 km².** La plupart du temps, les bassins sont dépourvus d'écoulement pérenne *(« vallons secs »)*, ce qui fait leur originalité par rapport aux autres inondations rencontrées dans ces régions (cf. chapitre 1).

Les dégâts occasionnés sont systématiquement importants. Ils se traduisent par des maisons inondées, des routes détruites, des voitures emportées, des incisons marquées dans les sols (ravines), et les dégâts matériels sont parfois associés à des pertes en vies humaines. Les personnes mobiles au moment de l'apparition de la crue sont les plus vulnérables. Les écoulements ont suffisamment de compétence pour engendrer des érosions majeures, même sur de courtes distances.

Les débits spécifiques sont élevés par rapport à la petite taille des bassins. La montée des eaux et la propagation des *« vagues de boue »* sont extrêmement rapides (en moins d'1 heure), ce qui justifie l'utilisation du terme *« crues rapides »*, même si ces événements se produisent dans le nord de la France. Le **ruissellement hortonien** est la seule source d'alimentation possible des crues, et la relation avec l'érosion des sols est évidente puisque les intensités des pluies dépassent rapidement les capacités d'infiltration des sols.

L'inventaire réalisé à partir des dossiers *« CatNat »* a permis de travailler directement sur la **sinistralité des inondations**. On s'intéresse au phénomène inondant, dommageable pour les populations, et non au phénomène naturel, l'aléa. Cet effort d'échantillonnage se heurte rapidement à un certain nombre de problèmes imputables aux objectifs réglementaires et à la qualité des données (cf. chapitre 2). Les événements recensés sont uniquement ceux qui ont donné lieu à des reconnaissances de l'état de *« catastrophe naturelle »* ; des doutes peuvent être émis sur la scientificité de la prise de décision de l'arrêté, avant tout politique (conflits Etat /élus/usagers), et le seuil pluviométrique paraît arbitraire pour des phénomènes orageux.

En mettant en place une démarche originale, et en contrôlant la qualité des informations incluses dans les dossiers *« CatNat »*, l'inventaire affine la spatialisation des *« crues rapides »* observées entre mai et août inclus. Les événements sont nombreux sur les huit départements étudiés : on recense 189 bassins versants touchés au moins une fois sur la période 1983-2005, 269 événements et 302 communes qui ont réellement subi des dégâts associés à des *« crues rapides »*. Cet inventaire confirme que ces crues sont rarement observées aux mêmes endroits puisque 68 % des bassins ont été touchés une seule fois.

L'évaluation des dégâts matériels et humains participe à une meilleure **caractérisation** du risque *« crues rapides »* (cf. chapitre 3). Si l'ampleur des sinistres reste variable d'un secteur à un autre, les événements ponctuels sont plutôt *« catastrophiques »* ; à l'inverse, les événements chroniques, moins intenses, semblent plus fréquents sur les bassins drainés. Le montant des dégâts (entre 500 k € et 15 M €) peut atteindre des **sommes considérables** par rapport à la taille des surfaces touchées. Une carte de synthèse (cf. chapitre 3) atteste de l'existence d'un risque disparate sur les huit départements. Cette disparité, dans l'ampleur et dans l'intensité des dégâts, est à corréler avec la localisation des zones urbanisées et avec l'importance des enjeux par rapport aux axes majeurs des écoulements.

► Des niveaux de complexité imbriqués à travers les échelles

L'analyse comparative menée sur les 189 bassins versants recensés a permis d'identifier des degrés de complexité observables à différents niveaux. En passant progressivement de l'échelle régionale à l'échelle du bassin versant, l'approche descendante met en évidence les facteurs de contrôle qui sont prédominants à chaque niveau d'observation (fig. 1.).

L'entrée **climatique** (type de temps, intensités et durées des pluies) est toujours le facteur de déclenchement de l'aléa : des cumuls de pluie volumineux (> 50 mm), tombant sur un pas de temps relativement court (< 15 h), sont à l'origine de ces « *crues rapides* ». L'analyse de la distribution spatiale des pluies de forte intensité monte l'existence d'un gradient spatial entre juin (ouest de la zone) et août (nord de la zone). Toutefois, la pluie n'est pas la seule variable de contrôle car des pluies de forte intensité peuvent entraîner d'autres types d'inondations (problèmes d'évacuation des eaux pluviales, ruissellements urbains) dans des secteurs plus faiblement pentus (Laganier *et al.*, 2000 ; Topin, 2000 ; Kergomard *et al.*, 2002).

A l'échelle régionale, c'est la morphologie qui a le premier rôle : **elle définit un stock de bassins versants suivant différents critères de sensibilité** (cf. chapitre 5). La répartition du relief, associée à la structure géologique, explique une première **zonation** de l'espace. Trois portraits types de bassins sensibles sont clairement identifiés :

Type 1.1 : bassins situés en aval de grands bassins versants, présentant des pentes fortes et des profils en long tendus **(128 entités**). Ces bassins, reliant les plateaux aux fonds de vallées humides, sont caractérisés par un saut d'ordre dans la classification de Strahler. Ce type 1.1, déjà observé en Seine-Maritime (Delahaye, 2002), est un profil type transposable pour l'ensemble des régions du nord de la France ;

Type 1.2 : bassins aux pentes fortes et situés sur des particularités géomorphologiques (rebords de plateaux, fronts ou revers de cuesta, buttes résiduelles). Ces configurations se prêtent à une concentration rapide des eaux sur de plus courtes distances (**50 entités**) ;

Type 2 : bassins versants situés en amont de plus grands bassins, avec des pentes moins prononcées, mais où les réseaux hydrographiques sont efficaces **(11 entités**).

A un niveau inférieur, à l'échelle du bassin versant, les seuils de fonctionnement sont très variables et les combinaisons entre l'occupation du sol, la morphologie et l'intensité des pluies sont multiples. Outre la nature du sol et des formations superficielles, la topographie, l'agencement spatial des surfaces ruisselantes, et les connexions entre les axes d'écoulement perturbent, ensemble, la linéarité de la réponse des bassins aux fortes pluies. En fonction des caractéristiques de chaque système, les seuils de fonctionnement ne seront pas les mêmes. Les bassins enherbés réagissent uniquement à des pluies « *extrêmes* ». A l'inverse, des bassins fortement cultivés peuvent produire des ruissellements importants au cours du mois de mai, période durant laquelle les cultures de printemps sont peu couvrantes. Ces événements sont également associés à des antécédents hydroclimatiques qui abaissent le seuil de réactivité de ces bassins (cf. chapitre 4). **Un mode de fonctionnement intermédiaire est mis en avant entre le système hivernal et le système printanier.**

L'occupation du sol est une composante importante mais ce **n'est pas la seule variable** de prédisposition car les bassins recensés ne sont pas tous majoritairement cultivés. Les cultures représentent plus de 40 % de la surface totale dans 84 % des bassins, et même plus de 60 % dans 68 % de l'échantillon. Ces chiffres sont toutefois faibles pour des bassins qui se situent dans ces régions de grande culture du Bassin Parisien. Si l'occupation du sol était d'ailleurs si discriminante, d'autres bassins devraient être recensés parmi les bassins touchés.

L'hétérogénéité de l'occupation du sol sur les petits bassins, associée à une **pluralité de configurations internes**, s'oppose à la relative stabilité des valeurs pour les grands bassins du type 2. Derrière la pluralité des occupations du sol se cache finalement un contrôle exercé par la variable morphologique. Plus un bassin se situe dans la partie aval d'un grand bassin

versant, plus il a de chance d'être encaissé, et donc plus fortement boisé. En revanche, un bassin situé à proximité des parties amont de grands bassins risque d'être largement cultivé. La répartition de l'occupation du sol sur les bassins du type 2 est plus homogène : la plus grande taille des bassins, un encaissement plus régulier, et la position en amont de grands bassins, peuvent expliquer le pourcentage des surfaces cultivées qui excèdent 60 %.

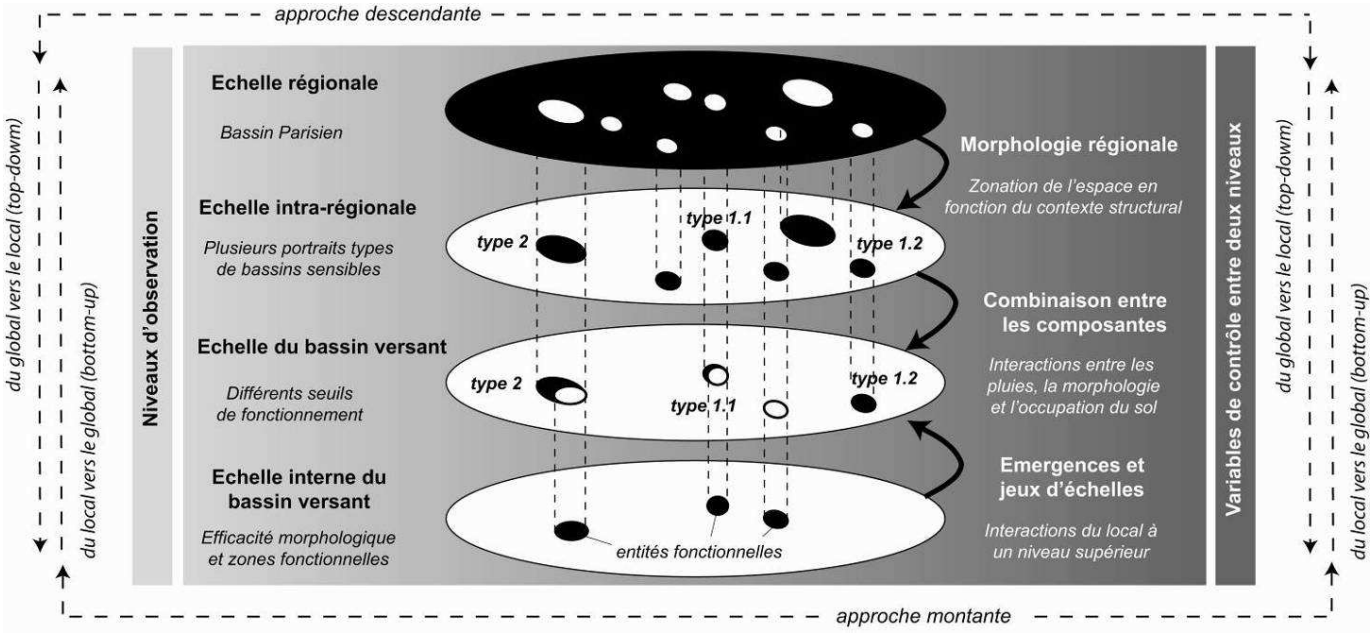


Fig. 1. Trois niveaux de complexité imbriqués à travers les échelles.

Cette approche descendante souligne le rôle omniprésent de la variable morphologique à travers différents niveaux d'observation. Son incidence reste néanmoins difficile à évaluer aux échelles locales. Les méthodes classiques se sont limitées à des mesures séparées des variables morphologiques (indices de compacité, rapport de confluence d'Horton, courbe hypsométrique). Il n'existe finalement aucune méthode permettant de mesurer, de manière synthétique et continue dans l'espace, son rôle sur la dynamique hydrologique d'un bassin versant. En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes, notamment sur les automates cellulaires, il a été possible de développer des méthodes permettant d'évaluer l'organisation morphologique d'un bassin versant, et de mesurer sa dynamique potentielle.

► Utiliser l'automate cellulaire comme outil d'investigation morphométrique

Les simulations montrent que l'automate *Ruicells* constitue un bon **outil d'investigation géomorphologique**. Contrairement aux indices morphométriques classiques (cf. chapitre 7), qui tentent de rechercher des lois d'organisation universelles (compacité, homothétie interne, distribution des biefs), l'automate traque toutes les « *anomalies* » morphologiques réellement explicatives du comportement hydrologique (cf. chapitre 9).

En faisant interagir les effets de forme (surface, réseau) et de pente (volume) à travers les échelles, et en passant d'un niveau local (cellulaire) à un niveau agrégé plus global (exutoire final), on cherche à **mieux appréhender la construction spatiale de la réponse hydrologique**

en tout point de l'espace. En général, les études hydrologiques sont classiquement menées à l'échelle globale du bassin versant (cf. chapitre 7). **Dans ce travail, on se place à des échelles plus fines pour mettre à jour les structures spatiales et les interactions à partir desquelles émergent une dynamique globale.**

Les signatures surfaciques traduisent les effets de forme et de réseau. Plus que la taille des bassins, ce sont les connexions entre les surfaces et les réseaux, et la distance des sous bassins par rapport à l'exutoire, qui conditionnent l'efficacité de la réponse hydrologique des bassins. Différentes configurations sont mises à jour en se concentrant sur la structuration du réseau au sein d'une forme donnée et sur son efficacité (indice IE). **43 % de l'échantillon** (soit 81 bassins) **paraît structurellement bien organisé.** Certains bassins présentent une efficacité structurelle interne (48 entités), d'autres sont homothétiques (9 entités), uniquement efficaces à leur exutoire (16 entités) ou «*hyper efficaces* » (8 entités). L'efficacité interne des bassins du type 2, différenciés au départ à partir de critères purement morphométriques (cf. chapitre 5), est confirmée par l'automate (cf. chapitre 9).

Les **effets de pente** sont ensuite intégrés dans les simulations. Après une analyse en plan, on peut ainsi quantifier l'incidence de l'encaissement sur la réponse hydrologique potentielle d'un bassin versant. Les écarts en terme de débits de pointe se réduisent entre les bassins du type 1, où la pente est plus prononcée, et les bassins du type 2, qui conservent une réactivité importante conférée par leur efficacité structurelle. Le système morphologique est désormais évalué dans son intégralité car les effets de forme, de pente et de réseau sont combinés.

Ces résultats amènent finalement à **reconsidérer la notion d'homogénéité hydrologique du bassin versant, qui a toujours été considérée comme l'unité spatiale de référence.** L'aire drainée par un exutoire donné n'a pas un fonctionnement homogène ; c'est simplement la surface en amont d'un point de mesure. La réponse hydrologique peut être conditionnée par le fonctionnement d'une petite partie du bassin, le reste de la surface n'étant qu'un *« corps d'accompagnement »*. La notion classique de *« bassin versant »* reste valide pour effectuer des bilans hydrologiques aux échelles annuelles ou mensuelles. En revanche, pour des pas de temps plus courts et pour des phénomènes hydrologiques violents, rapides et très localisés, **il semble plus pertinent de mettre l'accent sur les zones réactives d'un bassin en analysant les « *processus d'émergence* » qui animent la réponse hydrologique.**

► Perspectives de recherche

Tous ces résultats aboutissent finalement à dresser une carte de sensibilité des vallons les plus aptes à être touchés par des *« crues rapides »*. La morphologie conditionne la distribution des bassins potentiellement réactifs à l'échelle régionale (type 1) et la répartition spatiale des populations joue ensuite sur la **localisation des zones « *à risque* ».** Les espaces sujets à l'aléa sont désormais bien définis. En combinant cette information (espaces de prédilection) avec la prévision de l'aléa pluviométrique, on pourrait identifier des zones potentiellement réactives aux fortes pluies, et ainsi informer les populations locales d'un risque éventuel.

Ces résultats sont également importants pour de la gestion des systèmes *« hydrologiques»,* notamment pour mieux faire face au risque de *« crues rapides »* dans ces régions. Les points à très forte énergie hydraulique (avec IE > 60) identifient les zones où les écoulements peuvent rapidement se concentrer suite à un épisode pluvieux intense considéré comme uniforme sur l'ensemble du bassin (cf. chapitre 9). **Le fait d'avoir une représentation des trajectoires des**

écoulements en tout point de l'espace est également primordial pour gérer, voire diminuer, la vulnérabilité liée à la mobilité des personnes en temps de crise.

Si des zones habitées s'étendent sur ces « *espaces sensibles* », l'exposition des personnes à la concentration rapide et brutale des écoulements de surface devient très élevée (cf. chapitre 11). Les simulations mettent en avant toutes les confluences où les volumes d'eau peuvent théoriquement se concentrer sur n'importe quel bassin versant. Les indices IE les plus élevés sont bien corrélés avec des zones où les dégâts ont été les plus importants. En croisant cette information avec la distribution des espaces urbanisés, donc potentiellement vulnérables, les cartes affinent la spatialisation des zones « *à risque* » à une échelle intra-bassin. Il serait aussi possible d'identifier les surfaces en amont desquelles des aménagements pourraient être proposés pour atténuer la fonctionnalité hydrologique de ces surfaces. La spatialisation des zones les plus fonctionnelles pourrait ainsi guider l'aménagement de ces espaces.

Ces travaux peuvent trouver un écho important auprès d'autres chercheurs qui voient là un **apport méthodologique** pour leurs propres travaux. La théorie des systèmes complexes, et l'utilisation des outils d'analyse associées (systèmes multi-agents, automates cellulaires), fournissent les éléments de base pour répondre à des questions sur lesquelles les « *méthodes traditionnelles* » achoppent, tester des hypothèses, tenter des expérimentations (Lewin, 1994 ; Dauphiné, 2003 ; Pumain, 2003 ; Angotti, 2004). Elles offrent aussi l'avantage de faire partie d'un **champ pluridisciplinaire**, où les contributions des uns (informaticiens) permettent de répondre aux problématiques des thématiciens (Sanders, 2001), et vice-versa.

Après avoir développé de nombreux travaux sur les bilans érosifs, beaucoup d'équipes travaillent désormais sur les modalités du transport sédimentaire et la localisation des zones sources en sédiments (Coulthard *et al.*, 2006). Plusieurs automates ont déjà été conçus sur des sections de cours d'eau canalisées (CAESAR, Van de Wiel *et al.*, 2007, cf. Annexe 8.3.), ou sur des parcelles pour mesurer l'érosion à l'échelle métrique (Soda, Vallette *et al.*, 2006)…

Cette approche peut contribuer à ces travaux car la méthodologie développée pour des circulations d'eau est transposable aux circulations de matériaux. Des rapprochements sont déjà en cours avec plusieurs équipes, notamment dans le cadre des projets *Seine-aval 2* (piloté par B. Laignel, Université de Rouen) et *Climaster*, inclus dans le projet PSDR-GO (*Pour et Sur le Développement Régional Grand-Ouest)*, piloté par Ph. Mérot (INRA, AgroCampus, Rennes 2). Un rapprochement est aussi attendu avec Marco Van de Wiel (Ontario, Canada) pour voir si les automates *RuiCells* et *CAESAR* peuvent se compléter mutuellement.

Pour finir, il serait intéressant de chercher d'autres références pour parfaire le modèle, et voir si les simulations proposées avec *RuiCells* pourraient être utilisées afin d'appréhender la dynamique spatiale d'autres « *crues rapides* », et notamment les crues torrentielles du sud de la France (Lahousse, 1997 ; Liébault, 1997 ; Gaume *et al.*, 2000 ; Lahousse *et al.*, 2002 ; Arnaud-Fassetta, 2007) qui ont parfois été mesurés sur des bassins équipés (bassin de Draix, de la Bléone ; bassin du Guil…).

Références bibliographiques

A

Abrahams A. D. (1984) – Channel networks: a geomorphological perspective. *Water Resources Research*, 20, pp. 161-168.

AESN (Agence de l'Eau Seine-Normandie**)** (2005) – Schéma Directeur de Prévision des Crues (SDPC) de l'Agence de bassin Seine Normandie, AESN, Nanterre, 11 p.

Agasse E. (2005) – *Les crues de rivières en Basse-Normandie. Expression d'un système hydrogéographique complexe en milieu tempéré océanique.* Thèse de Géographie, Université de Caen B-N, 2 Volumes, 553 p.

Agasse E., Cador J.-M. (2006) – La cartographie des terroirs hydrologiques comme outil d'identification des zones participant à la genèse des crues. L'exemple de l'Oudon (Calvados). *Actes du colloque "Spatialisation et cartographie en hydrologie"*, sept. 2004, CEGUM.

Allen P. M., Torrens P. M. (Editors.) (2005) – Complexity and the limits to knowledge. *Futures,* Cambridge, 425 p.

Amore E., Modica C., Nearing M.A., Santoro V.C. (2004) – Scale effect in USLE and WEPP applications for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of hydrology*, 293, pp. 100-114.

Amoros C., Petts G. E. (1993) – *Hydrosystèmes fluviaux.* Editions Masson, Collection d'écologie, Paris, 24, 300 p.

Ambroise B. (1998) – Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1 - Processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau,* 11 (4), pp. 471-496.

Ambroise B. (1998) – Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1 – Modélisation systémique et dynamique. *Revue des Sciences de l'Eau,* 12 (1), pp. 123-153.

Angeliaume A. (1996) – *Ruissellement, érosion et qualité des eaux en terre de grande culture ; étude comparée de deux bassins versants du Laonnois et du Soisonnais.* Thèse de Géographie, Université de Lille 1, USTL, 2 volumes, 448 p. + annexes.

Angeliaume A., Wicherek S. (1997) – Contribution d'un bassin versant élémentaire cultivé à la formation des crues. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, pp. 155-167.

Angeliaume A., Wicherek S., Dacharry M. (1994) – Ruissellement, érosion et qualité des eaux en terres de grande culture – Etude de cas en Laonnois et Soissonnais. *Hydrologie continentale*, 9 (2), pp. 107-122.

Angotti A. (2004) – *Aborder facilement la complexité.* Editions d'organisation, Paris, 242 p.

Anquetin S., Miniscloux F., Creutin J.D., Cosma S. (2003) – Numérical simulation of orographic rainbands. *Journal of geophysical research*, 108, CIP. 11, pp. 1-13.

Antoine J.-M., Desailly D., Gazelle F., (2001) – Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes, *Annales de Géographie*, Editions Armand Colin, Paris, 110ème année, 622, pp. 597-623.

Antoni J.-P. (2006) – Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort. *Cybergéo*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, 347 ; http://www.cybergeo.eu/index2436.html

Archambault M., Lhénaff R., Vanney J.-R. (1989) – Documents et méthodes pour le commentaire de cartes. *2ème fascicule*, Editions Masson, Paris, 160 p.

Arnaud-Fassetta G. (2007) – *L'hydrogéomorphologie fluviale, des hauts bassins montagnards aux plaines côtières : entre géographie des risques, géoarchéologie et geosciences.* Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, HDR, Université Paris-Diderot (Paris 7), 3 volumes, 35 p., 435 p. et 357 p.

Arnaud-Fassetta G., Cosssart E., Fort M. (2005) – Hydrogéomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Gill catchment (Queyras, French Alps). *Geomorphology,* 66, pp. 41-67.

Auzet A.-V., Boiffin J., Papy F., Ludwig B., Maucorps J. (1993) – Rill erosion as a function of characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena*, 20, pp. 41-62.

Auzet A.-V., Boiffin J., Ludwig B. (1995a) – Erosion hydrique dans les bassins versants agricoles des régions limoneuses du nord-ouest de la France. *Annales de Géographie,* n° 281/282, pp. 187-190.

Auzet A.V., Boiffin J., Ludwig D. (1995b) – Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. Earth Surface Processes and Landform 20, 759– 767.

Auzet A.-V., Malet J.P. (2005) - Aléa naturels à l'origine des « *coulées de boue* ». Note interne rédigée à l'attention du BRGM, non publiée.

Auzet A.-V., Heitz C., Armand R., Guyonnet J., Moquet J.-S. (2005) – *Les « coulées de boue » dans le Bas-Rhin : analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.* Rapport de l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, IMFS, 29 p.

Avolio M. V., Crisci G. M., Di Gregorio S. D., Rongo R., Spataro W., Trunfio G. A. (2006) - SCIARAγ2: An improved cellular automata model for lava flows and applications to the 2002 Etnean crisis. *Computer and sciences*, 32, pp. 876-889.

B

Bak P. (1999) – *Quand la nature s'organise. Avalanches, tremblements de terre et autres cataclysmes*. Editions Flammarion, Paris, 283 p.

Baize S. (1998) – *Tectonique, eustatisme et climat dans un système géomorphologique côtier. Le Nord-ouest de la France au Pleistocène : exemple du Cotentin (Normandie)*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 333 p.

Ballais H. et Ballais J.-L. (1994) – Eléments pour une histoire des inondations dans le Calvados au XVIIIè et XIXè siècles d'après les archives départementales. *Travaux du centre de recherche en géographie physique de l'environnement*, CREGEPE, 5, Caen, pp. 19-44.

Bardossy A., Schmidt F. (2002) – GIS approach to scale issues of perimeter-based shape indices for drainage basins. *Hydrological Sciences*, 47 (6), pp. 931-942.

Bates P.D., De Roo A.J. (2000) – A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, 236, pp. 54-77.

Battiau-Queney Y. (1993) – *Le relief de la France : coupes et croquis.* Editions Masson, Collection Géographie, Paris, 252 p.

Battiau-Queney Y. (2004) – La géomorphologie, des origines à nos jours : une science jeune arrivée à maturité. *Association des Géographes Français,* Paris, 1, pp.4-14.

Batty, M., Couclelis H., Eichen M. (1997) – Special issue: urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B.*, 24 (2).

Batty M., Torrens P. M. (2001) – Modeling Complexity: The Limits to Prediction. *Cybergeo*, 201, pp. 1-29

Baulig H. (1926) – Sur une méthode d'analyse altimétrique appliquée à la Bretagne. *Bulletin de l'Association des Géographes Français (BAGF)*, 10, pp. 7–9.

Baulig H. (1950) **–** *Essais de géomorphologie.* Publication de la faculté de lettres de Strasbourg, Collection les Belles Lettres, 113, Paris, 160 p.

Baulig H. (1957) – Les méthodes de la morphologie d'après P. Birot. *Annales de Géographie*, Bulletin de la Société de Géographie, Editions Armand Colin, Paris, 66 (354, 355), pp. 97-124 et 221-236.

Baulig H. (1959) – Morphométrie. *Annales de Géographie,* Bulletin de la Société de Géographie (BSG), Editions Armand Colin, Paris, 68 (369), pp. 285-408.

Bel Hadjkacem M.S., Chevallier J.-J., Robert J.-L., Gold C. (1998) – Intégration de la méthode des éléments finis dans un système d'information hydrologique pour la gestion stratégique des eaux en surface. *Revue Internationale de Géomatique*, 8 (4), pp. 301-318.

Belliard R., Forget R., Hémond A. (1975) – *Le Voyage aérien*. Editions du Cosmos, tome 1, 8ème édition, 200 p.

Bendjoudi H., Hubert P. (2002) – Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences, Journal des sciences hydrologiques,* 47 (6), pp. 921-930.

Benkhadra H. (1997) – *Battance, ruissellement et érosion diffuse sur les sols limoneux cultivés. Déterminisme et transfert d'échelle de la parcelle au petit bassin versant*. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 210 p. + annexes.

Berger K.P., Entekhabi K.P. (2001) – Basin hydrologic response relations to distributed physiographic descriptors and climate. *Journal of Hydrology*, 247, pp. 169-182.

Bermond M. (2004) – *Agriculture, familles, exploitations en Normandie au début du XXIème siècle. Produire et se reproduire dans la crise*. Thèse de Doctorat de l'Université de Caen – CRESO, Caen, 460 p.

Bernard M. (2005) – *Les crues du 1er juin 2003 dans le Pays d'Auge. Diagnostic d'un phénomène exceptionnel*. Mémoire de Maîtrise, Université de Caen Basse-Normandie, 123 p.

Bethemont J., Andriamahefa H., Roger C. F., Wasson J.-G. (1996) – Une approche régionale de la typologie morphologique des cours d'eau. Application de la méthode " morphorégions " au bassin de la Loire et perspectives pour le bassin du Rhône**,** *Revue de géographie de Lyon*, 71 (4), pp. 311-322.

Beuselinck L., Steegen A., Govers G., Nachtergaele J., Takkean I., Poesen J. (2000) – Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology*, 32, pp. 69-82.

Beven K., Woods E.F. (1983) – Catchment geomorphology and the dynamic of runoff contributing areas. *Journal of hydrology,* 39, pp. 139-150.

Beven K., Woods E.F. (1993) – Flow routing and the hydrological response of channels networks. *In* Beven K, Kirkby M. J. (Eds), *Channel Network Hydrology*. Wiley, Chichester, 420 p.

Beven K., Woods E. F., Sivapalan M. (1988) – On hydrological heterogeneity - catchment morphology and catchment response. *Journal of hydrology,* 100, pp. 353-375.

Beven K. (2003) – *Rainfall-runoff modelling, the primer*. Wiley Editors Ltd, London, 360p.

Birot P. (1949) – *Essai sur quelques problèmes de morphologie générale*. Instituto para a alta cultura, Centro de Estudios Geograficos, Lisbonne, 150 p.

Birot P. (1955) – *La méthode de la morphologie.* Editions Orbois, Collection PUF, 180 p.

Blache J. (1928) – Volume montagneux et érosion fluviatile. *Revue de Géographie alpine*, Grenoble, 16, pp. 454-497.

Blache J. (1942) – Des versants aux rivières. *Revue de géographie alpine*, Grenoble, 30, pp. 1-50.

Blanchard E., King C., Le Bissonnais Y., Bourguignon A. Souchère V., Desprats J.F., Maurizot P. (1999) – Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la Télédétection et de Systèmes d'Information Géographiques. *Etude et gestion des sols*, 6 (3), pp. 181-199.

Boardman J., Evans R., Ford J. (2003) – Muddy floods on the South Downs, southern England: problem and responses. *Environmental Sciences & Policy*, 6, pp. 69-83.

Bocco G., Mendoza M., Velasquez A. (2001) – Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping: a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39 (3-4), pp. 211-219.
Boiffin J., Papy F., Eimberck M. (1988) – Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. 1. Analyse des conditions de détachement de l'érosion. *Agronomie*, 8, pp. 663-673.
Bolline A. (1982) – *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en Moyenne Belgique*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, 380 àP
Bogaart B.W., Tucker G.E., Vries J.J. (2003) – Channel network morphology and sediment dynamics under alternating periglacial and temperate regimes: a numerical simulation study. *Geomorphology*, 54, pp. 257-277.
Bourgeault P., Binder P., Buzzi A., Dirks R., Houze R., Kuettner J., Smith R., Steinacker R., Volkert H. (2001) – The MAP special observing period. *Bull. Am. Meteor. Soc*, 82, pp. 443-462.
Bravard J., Petit F. (2000) – *Les cours d'eau ; Dynamique du système fluvial*. Editions Armand Colin, Collection U, Paris, 222 p.
Breyer, S.P., Snow, R.S. (2002) - Drainage basin perimeters: A fractal significance. *In* R. S. SNOW and L. MAYER (eds.), *Special issue on Fractals in Geomorphology, Geomorphology*, 5, pp. 143-157.
Brierley G., Fryirs K., Jain V. (2006) – Landscape connectivity : the geographic basis of geomorphic applications. *Area*, 38.2, pp. 165-174.
Bronstert A., **Bardossy A.** (2003) - Uncertainty of runoff modelling at the hillslope scale due to temporal variations of rainfall intensity. *Physics and Chemistry of the Earth,* 28, pp. 283–288.
Brunstein D., Penven M.-J., Muxart T. (2007) – Développement de la croûte de battance et exportation des MES en région de grande culture (Brie)*, in Du continent au bassin versant. Théorie et pratiques en géographie physique (Hommage au Professeur Alain Godard*), Paris, 592 p., pp. 437-448.
Burel F., Baudry J. (2001) – *Ecologie du paysage – Concepts, méthodes et applications*. Editions Tech et Doc, , 362 p.
Bursik M., Martinez-Hackert B., Delgado H., Gonzalez-Huesca A. (2003) – A smoothed-particle hydrodynamic automaton of landform degradation by overland flow. *Geomorphology*, 53, pp. 25-44.

C

Cador J.-M. (2005)– Seuils et normes en hydrologie ; La prise en compte des évènements extrêmes dans la gestion des eaux. *Cahiers de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines*, Presses Universitaires, Caen, 42, pp. 63-82.
Calvet M. (2000) - Du bon usage de la morphométrie. *Géomorphologie relief, processus, environnement*, 4, pp. 267-271.
Calvet M., Lemartinel B. (2002) – Précipitations exceptionnelles et crues-éclair dans l'aire pyrénéo méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 35-50.
Cantat O. (2005a) – Dynamique spatio-temporelle d'un évènement météoclimatique extrême : la canicule de l'été 2003 en Europe de l'Ouest. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, 2, pp. 99-136.
Cantat O. (2005b) – *Normandie : terre de contrastes. Conséquences hydrologiques et environnementales d'un climat tempéré mais pas sans contrastes…* Journées 2005. *Hydrosystèmes normands*. CNFG, Comité National Français de Géographie, Commission « *Hydrosystèmes continentaux* », pp. 22-42.
Cantat O. (2006) – Contribution partielle au rapport GACH2C. Non publié, 10 p.
Cantat O., Cador J.-M., Agasse E. (2002) – L'originalité des inondations de 2000-2001 dans la Plaine de Caen (Normandie, France). Quand la remontée des nappes souterraines prolonge les débordements de rivières...", *Annales de géographie,* 625, pp. 246-264.
CAR (Comité d'Aménagement Rural) **de la Canche et de l'Authie** (1978) – Etude sur l'érosion des terres agricoles dans le Val de Canche. Programme érosion. Proposition n° 9 du contrat de pays. 2 documents, 18 p. et 36 p.
Carroza J.-M., Delcaillau B. (2000) – Réponse des bassins versants à l'activité tectonique : l'exemple de la terminaison orientale de la chaîne pyrénéenne. *Appr. Morphotecton. Geomorphol*, 1, pp. 45-60.
Cartier S. (2002) – Ruissellement érosif : prévention des risques ou des conflits ? *Nature, Sciences, Sociétés,* 10 (3), pp. 48–53.
Cauvin C., Rimbert S. (1976) – *Les méthodes de la cartographie thématique. Fascicule 1 – La lecture numérique des cartes thématiques*. Editions Universitaires de Fribourg, Fribourg (Suisse), pp. 53-80.
Cavendish J.C. (1974) – Automatic triangulation of arbitrary planar domains for the finite element method. *Int. J. of Num. Meth. Eng.*, 8, pp. 256-273.
Cemagref (1986) – *Les dégâts causés par les pluies intenses dans le bassin de Croult (Val d'Oise).* Rapport d'étude, Antony, 27 p.
Cemegref (1987) – *La genèse du ruissellement sur les terres agricoles – Approche par simulation de pluie dans le Val d'Oise.* Rapport d'étude, Antony, 18 p.
Cerdan O. (2001) – *Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés*, Thèse en Sciences de l'Univers, Université d'Orléans, INRA, 175p.
Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H., Souchère V. (2002) – Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil & Tillage Research*, 67, pp. 99-108.
Chambre d'Agriculture de la Somme, 1990 - Lutte contre l'érosion des sols dans le Ponthieu. Bilan des trois années d'actions et de sensibilisation (1988-1990). Amiens, 36p.

Chaput J.-L. (2005) - *Initiation à la géomorphologie,* 2ème édition, Editions Ellipses, Collection Universités – Géographie, 174 p.

Charleux-Demargne J. (2001) – *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie ; Application à la caractérisation du régime des crues des bassins versants*, Thèse en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, Cemagref, 350 p.

Chorley R. J., Malm D. E. G, Pogorzelski H. A. (1957) – A new standard for estimating drainage basin shape. *American Journal of Sciences*, 255, pp. 138-141.

Chorley R. J. (1969) – *Water, Earth and Man: a synthesis of hydrology, geomorphology and socio-economic geography,* Editions Meuten and Company Ltd, London, 590 p.

Chorley R. J. (1972) – *Spatial analysis in geomorphology,* Meuthen and Co Ltd, London, 393 p.

Christofoletti A. (1970) - *Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas (MG),* Tese de Livre Docência, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Rio Claro, Brasil, 1970, 210 p.

Collectif, **Ministère de l'Environnement** (1996) – *Les "coulées de boue" liées à l'érosion des terres agricoles. Dossiers et cartes nationaux, dossiers et cartes régionaux.* [non publié] (www.ifen.fr)

Collier C. G., Fox N. I. (2003) – Assessing the flooding susceptibility of river catchments to extreme rainfall in the United Kingdom, *Intl. J. River Basin Management*, 1 (3), pp. 1-11.

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*, 2, pp. 15-24.

Coque R. (1998) : *Géomorphologie* – Editions Armand Colin, Collection U, Paris (6ème édition), 495 p.

Corgne S. (2004) – *Modélisation prédictive de l'occupation du sol en contexte agricole intensif : Application à la couverture hivernale des sols en Bretagne*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2, 240 p.

Cosandey C. (1996) – De l'origine de l'écoulement rapide de crue dans un massif forestier breton. *Zfur Geomorphologie,* Band 60, pp. 177-186.

Cosandey C. (1990) – L'origine des crues dans les bassins versants élémentaires : du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue. *Annales de Géographie*, Editions Armand Colin, Paris, 556, pp. 641-659.

Cosandey C., Robinson M. (2000) - *Hydrologie continentale*, Armand Colin, Collection U, Paris, 2000, 360p.

Cosandey C. (2003) – *Les eaux courantes,* Editions Belin, Collection Géographie, Paris, 240 p.

Costa J. E. (1987) – Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. *Journal of hydrology*, 93 (3-4), pp. 313-338.

Costa-Cabral M.C., Burges S.J. (2002) – Sensitivity of channel network planform laws and the question of topologic randomness. *Water Resources Research* 33 (9), pp. 2179-2197.

Coucleclis H. (1985) – Cellular words: A framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and planning A*, 17, pp. 585-596.

Coussot P., Meunier M. (1996) - Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Review*, 40, 209-227.

Coulthard T. J., Kirkby M. J., Macklin M. G. (2000) – Modelling geomorphic response to environmental change in an upland catchment. *Hydrological Processes*, 14, pp. 2031-2045.

Coulthard T. J., Macklin M. G. (2001) – How sensitive are river systems to climate and land use changes? A model-based evaluation. *Journal of Quaternary Science*, 16, pp. 347–351.

Coulthard T.J., Lewin J., Macklin M.G. (2005) – Modelling differential catchment response to environmental change. *Geomorphology*, 69, pp. 222-241.

Coulthard T. J., Van de Wiel M. J. (2006) - A cellular model of river meandering, *Earth Surf. Process. Landforms*, 31, pp.123-132.

Coulthard T. J., Hicks D. M., Van de Wiel M. J. (2007) – Cellular modelling of river catchments and reaches: advantages, limitations and prospects. *Geomorphology*, 90, pp. 192-207.

Crave A. (1995) – *Quantification de l'organisation des réseaux hydrographiques*, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 210 p.

Crave A., Davy P. (2001) – A stochastic "precipiton" model for simulating erosion/sedimentation dynamics. *Computers & Geosciences*, 27 (7), pp. 815–827.

Crisci G.M., Di Gregorio S., Rongo R., Scarpelli M., Spataro W., Calvari S. (2003) - Revisiting the 1669 Etnean eruptive crisis using a cellular automata model and implications for volcanic hazard in the Catania area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, pp. 211-230.

Cudennec C. (2000) – *Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR), Rennes, 260 p.

Cudennec C. (2008) – *De quelques transferts, structures et interfaces en hydrologie*. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches (HDR), ENSAR, AgroCampus Rennes, 58 p.

Cudennec C., Calvez R., Pouget J.C., Kingumbi A. Le Goulven P. (2004) – Constitution et structuration territoriales des ressources, des impacts et des risques hydrologiques au sein du bassin du Merguellil – Perspectives de modélisation hydrologique pour la transposition d'approches de gestion. *Actes du Séminaire PSI, Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant,* Montpellier, France.

D

Dacharry M. (1988) – Averse et crue du 1er septembre 1987 en Brie (Bassin du Petit Morin). *Hydrologie continentale*, 3 (1), pp. 3-17.

D'Ambrosio, D., Di Gregorio S., Iovine G., Lupiano, V., Rongo R., Spataro, W. (2003) – First simulations of the Sarno debris flows through Cellular Automata modelling. *Geomorphology,* 54, pp. 91-117.

Daudé E. (2004) – Apports de la Simulation Multi-Agents à l'étude des processus de diffusion. *Cybergéo, Revue européenne de géographie*, 255, 16 p. (liens ??)

Dauge Y. (1999) – *Les politiques publiques de prévention des inondations*, Rapport au Premier Ministre, , Paris, 56p.

Dauphiné A. (1995) – *Chaos, fractales et dynamiques en géographie*, Collection Espaces, modes d'emploi, Editions Reclus, Paris, 135 p**.**

Dauphiné A. (2001) – R*isques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Armand Colin Eds, Collection U, Paris, 288 p.

Dauphiné A. (2003) – *La théorie de la complexité chez les géographes*. Edition Anthropos, Paris, 247 p.

Dauphiné A., Provitolo D. (2003) – Les catastrophes et la théorie des systèmes auto-organisés critiques. In MORINIAUX V. (coord.), *Les risques*. Editions du Temps, Collection Questions de Géographie, pp. 22-36.

Dearing J., Plater A., Richmond N., Prandle D, Wolf J. (2005) - Towards a high resolution cellular model for coastal simulation (CEMCOS). Tyndall Centre for Climate Change Research, Technical Report, 26, 71 p.

D'Ercole R. (1994) – Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, 4 (tome LXXXII), pp. 87-96.

De Martonne E. (1948) – *Traité de géographie physique.* Editions Armand Colin, Collection Le relief et le sol, Paris, tome 2, 1056 p.

De Roo A.P.J. (1993) – *Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using geographical information systems. Variability and applicability of the 'ASNWERS' model in two catchments in the loess area of South Limbourg and one in Devon*. Thèse de Doctorat, Université d'Utrecht, 295 p.

De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J. (1996) – LISEM : a single-event physically based hydrological and soil model for drainage basins. I/Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10, pp. 1107-1117.

De Vente J., Poesen J. (2005) – Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale : Scale issues and semi-quantitative models. *Earth surface reviews*, 71, pp. 95-123.

Debelmas J. (1991) – *Les grandes structures géologiques.* Editions Dunod, Collection Sciences de la Nature, 236 p.

Delahaye D. (1999) – Originalité des risques hydrologiques ; La catastrophe de St Martin de Boscherville en juin 1997. *Etudes Normandes*, 1-2, pp. 157-170.

Delahaye D. (2002) : *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie - modélisation et approche multiscalaire des risques.* Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 2 tomes, Laboratoire Modélisation et Traitements Graphiques (MTG) Université de Rouen, 250p.

Delahaye D. (2003) – Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture. Analyse spatiale d'un phénomène complexe. *BAGF*, 3, pp. 287-301.

Delahaye D. (2005) : Modélisation d'un système spatial complexe : le bassin versant : *In* **Guermond Y.** (Eds) - *Modélisations en géographie – Déterminismes et complexités.* Editions Hermès-Lavoisier, Collection IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Paris, pp. 235 - 259.

Delahaye D., Douvinet J., Langlois P. (2005) – *Rapport à mi-parcours du Projet SYMBAD – Analyse de la structure et de la dynamique d'un système spatial complexe : le bassin versant.* Actes des Journées "*Systèmes complexes en SHS*", 21-22 Nov., Paris, pp. 61-69.

Delahaye D., Douvinet J., Langlois P. (2007a) – Le bassin versant : de l'unité spatiale aux sous unités fonctionnelles. *Actes du Colloque de Cerisy « Systèmes complexes en SHS »,* Cerisy, 28 mai-3juin, 15 p.

Delahaye D., Douvinet J., Langlois P., Gaillard D. (2007b) – *Modelling the dynamic effects of catchment morphology on surface flow paths in small catchments of the Paris Basin, France*. Poster at the European Geosciences Union (EGU), General Assembly, 15-20 April 2007, Vienna, Austria.

Delahaye D., Gaillard D. (2001) – Vers une gestion concertée des espaces agricoles contre le ruissellement et les crues rapides. *Actes du colloque « Outils de prévention des inondations »*, Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles, Paris, pp. 47-49.

Delahaye D., Guermond Y., Langlois P., (2001) - Spatial interaction in the runoff process, Proc. of the 12th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, St Valéry en Caux http://www.cybergeo.eu/index3745.html

Delahaye D., Hauchard E. (1998) – Analyse spatiale des processus de ruissellement en Pays de Caux au travers de quelques épisodes critiques, *Bulletin de l'Association de Géographes Français (BAGF)*, CNRS, Paris, pp. 306-315**.**

Delcaillau B., Ozouf J.-C., Masiee D., Laville E., Coutard J.-P. (1998) – Evolution géomorphologique d'un versant côtier : l'exemple de la Touques (Basse-Normandie). *C.R.A cad. Sciences,* 326, pp. 609-615.

Delcaillau B. (2001) – Geomorphic response to growing fault-related folds: example from the foothills of central Taïwan. *Geodynamica Acta*, 14, pp. 265-287.

Delcaillau B. (2004) - *Reliefs et tectonique récente*, Ed. Vuibert, Paris, 259 p.

Depraetere C., Moniod F. (1991) – Contribution des modèles numériques de terrain à la simulation des écoulements dans un réseau hydrographique : exemple du bassin de Bras-David (Guadeloupe). *Hydrologie continentale*, 6, pp. 29-53.

Derancourt F. (1995) – *Erosion des terres agricoles ; méthodologie proposées à l'étude de bassins versants agricoles.* Rapport Chambre d'Agriculture Pas-de-Calais, 15 p.

Derancourt F. (1994) – *Aménagements contre l'érosion des sols. Site d'étude du Tubersent. Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Basse Vallée de la Canche*. Rapport Chambre d'Agriculture du Pas-De-Calais. 25 p. + annexes.

Derruau M. (1996) – *Les formes du relief terrestre*. Editions Masson, Paris, 430 p.

Devaud P. (1995) : *L'érosion des sols dans le département de la Somme*. Mémoire de DESS Environnement, aménagement, développement agricole. Agence de l'eau Artois-Picardie, 102 p.

Derville I. (1994) : *Maîtrise de l'érosion et du ruissellement en région de grande culture dans le cadre du pré-SAGE Vexin-Thelle.* Mémoire de DEA national d'Hydrologie, 58p. + annexes.

Dietrich W. E., Wilson C. J., Montgomery D. R., McKean J. (1993) – Analysis of erosion threshold, channel network and landscape morphology using a digital terrain model. *Journal of Geology*, 3, pp. 161-180.

Di Gregorio S., Serra R., Villani M. (1998) - Simulation of soil contamination and bioremediation by a cellular automaton model. *Complex Systems,* 11 (1), pp. 31–54.

Dmitriev A.I., Popov V.L., Psakhie S.G. (2006) – Simulation of surface topography with the method of movable cellular automata. *Tribology International,* 39, pp. 444-449.

Doornkamp J. C. (1969) – The role of inselbergs in the geomorphology of southern Uganda", *Transactions of the Institute of British Geographers*, 44, pp. 151–162.

Doswell C.A., Brooks H.E., Maddox R. A. (1996): Flash flood forecasting, an ingredients-Based Methodology, *Weather and Forecasting,* 11, pp. 560-581.

Douay F. (1980) : Erosion des terres agricoles dans le Nord-Pas-de-Calais. Mémoire de DEA de Pédologie au SRAE, Lille. 48 p. + annexes.

Dourlens C. (2001) – *Gestion pragmatique du risque et déstabilisation sociale*. Actes du séminaire (dir.), Ministère de l'Equipement et PUCA, 103 p.

Douvinet J. (2004) – *Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes : les bassins versants sensibles aux crues rapides,* Mémoire de DEA, Université de Caen Basse-Normandie, 82 p. + annexes.

Douvinet J. (2006a) – Intérêts et limites des données « *CatNat* » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « *crues rapides* » liées à de violents orages (Bassin Parisien, Nord de la France). *Norois*, Presses Universitaires de Rennes, 201, 2006/4, pp. 17-30.

Douvinet J., (2006b) – *Simulation de la dynamique spatiale de processus hydrologiques : l'exemple des « crues rapides » du Nord de la France (Bassin Parisien). Journée Rencontre des doctorants en SHS* organisées par le Réseau Thématique Pluridisciplinaire Modélisation des dynamiques spatiales (RTP MoDys), 8-9 Novembre, Lyon, pp. 8-13.

Douvinet J. (2008) – *Effets de seuils et d'échelle sur le fonctionnement des hydrosystèmes : le cas des « crues rapides » dans les régions de grande culture du nord de la France.* Journées « *Hydrosystèmes fluviaux* », organisées par Paris 7 – Diderot et la commission Hydrosystèmes continentaux du CNFG, 5 avril 2008, Paris, 10 p.

Douvinet J., Agasse E. (2006) – Améliorer la cartographie des inondations par une méthode de spatialisation originale combinant la nature des crues et la réponse des pays hydrologiques – L'exemple du Calvados sédimentaire (Basse-Normandie). *Jeunes chercheurs en Sciences Humaines et Sociales,* Cahiers de la MRSH, PUC, Presses Universitaires de Caen, pp. 27-44.

Douvinet J., Bernard M., Delahaye D. (2005a) – Les « *crues rapides* » dans la basse vallée de la Touques. : L'exemple du 1er juin 2003. *Les hydrosystèmes normands - Livret-Guide de l'excursion 2005 de la commission « Hydrosystèmes Continentaux » du CNFG* organisé par le Geophen-LETG, Caen, pp. 76-80.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., (2005b) – Catchment morphgology and dynamics of hyper-concentrated stream flows on loamy plateaux (Basin Paris, in the North-Westren part of France). Poster au *Sixth International Conference on Geomorphology on "Geomorphology in regions of environmental contrasts" (ICG),* 7-11 Sept., Zaragoza, Espagne.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2006a) – Les apports de l'IAD à la caractérisation morphométriques des bassins versants sensibles aux crues rapides hyper-concentrées (Bassin Parisien, Nord de la France) – *Proc. Inter. Conference On Interactions Nature-Sociétés. Analyse et modèle*, La Baule, CD-ROM, 6 p.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2006b) – Application of cellular automata modelling to analyse the dynamics of hyper-concentrated stream flows on loamy plateaux (Paris Basin, North-western France). *Proceedings of the 7th International Conference on HydroInformatics, "Innovate and share",* Nice (France), Volume 2, p.1088-1094.

Douvinet J., Delahaye D. (2007) – *Bassins versants sensibles et « crues rapides hyper-concentrées » en plaine picarde : Les sites de Pas-en-Artois (Authie) et Rebreuviette (Canche).* Livret-guide des *Journées Hydrosystèmes anthropisés* de la vallée de la Somme (Picardie), organisées par les Commissions du CNFG Biogéographie et Hydrosystèmes continentaux et l'UMR 8591 CNRS, 9-11 Juillet 2007, Picardie, p. 25-35.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2007a) – De la morphométrie à un champ de mesure de la structuration d'un bassin versant. *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO'2007)*, 18-20 juin, Clermont-Ferrand, CD-ROM, 16 p.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., (2007b) – A synthetic and dynamic morphometric index based on cellular automata for the improvement of classical methods. Poster at the *European Geosciences Union (EGU*), General Assembly, 15-20 April 2007, Vienna, Austria.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2007c) – Cellular Automata in Physical Geography – Use of cellular automata models to improve knowledge on hyperconcentrated stream floods in the Paris Basin. *Proceedings of the XIVth European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography (ECTQG'07),* 7-11 sept., 4 p.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2008a) – Modélisation de la dynamique spatiale potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergéo*, 412. http://www.cybergeo.eu/index16103.html

Douvinet J., Planchon O., Cantat O., Delahaye D. (2008b) – Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « *crues rapides* » dans le nord de la France. *Actes du XXIème Colloque international de Climatologie*, Montpellier, 9-12 septembre 2007, pp. 207-213.

Douyer F. (1987) – *Incidence de l'érosion et coût des interventions pour limiter les dégâts en Haute-Normandie,* INRA et Université de Rouen, 18 p.

Douyer F. (1999) – Essai de quantification du coût de l'orage du 13 mai 1998 sur Fécamp et le bassin versant de Ganzeville. Rapport de la Direction Régionale de l'Agriculture, des eaux et Forêts (DRAF), Rouen, 15 p. + photos.

Drogoul A. (1993) – *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes*. Doctorat, Paris, 230 p.

DRAF (Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts du Pas de Calais) (1996) – Etude hydrologique des bassins versants Nord et Ouest en amont d'Auchy les Hesdin. Rapport final, 30 p.

Drobot S.D., Benight C., Gruntfest E.C. (2007) – Risk factors for driving into flooded roads. *Environmental Hazards*, 7, pp. 227-234.

Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P. (2002) – Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle « Spacelle ». *Espace géographique*, Editions Reclus, Collection Belin, Paris, 33 p.

Dufour J., Gravier J., Larue J.-P. (1990) – Fortes pluies et érosion des sols. L'orage de Mai 1988 dans la Sarthe, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Paris, 2, pp. 159-170.

E

EMERGENCE (2003) - Etude des ruissellements sur le bassin versant du ru du Moulin (communes d'Aizelles, d'Aubigny en Laonnois et de Saint Thomas). Rapport du bureau d'études, 80p.

Engelen, G., White R., Uljee I., Drazan P. (1995) - Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 37, pp. 203-214.

Escofier B., Pagès J. (1990) – *Analyses factorielles simples et multiples*. Editions Dunod, Paris, 2ème édition, 270 p.

Escourrou G. (1978) – *Climats et types de temps en Normandie*. Thèse de Doctorat, Université de Lille III, 3 volumes, 1081 et 649 p.

Escourrou G. (1982) – *Le climat de la France*, Editions PUF, Collection Que sais-je ?, Paris, 127 p.

Escourrou G. (2003) – *Climatologie pratique*. Editions Masson, Paris, 172 p.

Estupina-Borell V. (2004) – *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prevision opérationnelle des crues éclair – Application à des petits bassins versants du sud de la France*. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, option Hydrologie, INP Toulouse, 250 p.

Estupina-Borell V., Dartus D., Abadou R. (2006) – Flash flood modelling with the MARINE hydrological distributed model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3, pp. 3397-3438.

Evrard O., Persoons E., Vandele K., Van Wesemael B. (2007) - Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods: A case study in the Belgian loam belt, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, pp. 149-158.

F

Faraco G., Pantano P., Servidio R. (2006) – The use of cellular automata in the learning of emergence. *Computers and education*, 47, pp. 280-297.

Favis-Mortlock, D. (1998) - A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes. *Computers & Geosciences* , 24, pp. 353–372.

Fonstad M. A. (2006) - Cellular automata as analysis and synthesis engines at the geomorphology-ecology interface. *Geomorphology*, 77 (3-4), pp. 217-234.

Font M. (2002) – *Signature morphologique des déformations en domaine intraplaque : Applications à la Normandie*. Thèse de Doctorat en Géologie, Université de Caen Basse-Normandie, 389p.

Frémaux C. (2002) – La responsabilité des maires face aux risques naturels. *Annales des Mines,* Paris, pp. 43-48.

Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J., Spencer C. (2007) – Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, 84, pp. 297- 316.

G

Gaillard D. (2004) – *Gestion concertée du ruissellement érosif dans les espaces agricoles des plateaux de grande culture. Analyse spatiale, approche socio-économique et mise en place d'une dynamique collective d'aménagement. Exemple de la Seine-Maritime.* Thèse de Doctorat, Université de Rouen, Volume 1, 1-364p. Volume 2, Annexes, 365-508p.

Gaillard D., Delahaye D., Langlois P. et Jaziri W. (2002) : L'automate cellulaire comme outil de cartographie de la dynamique du ruissellement en territoire agricole, *in D. Delahaye, F. Levoy et O. Maquaire (Eds) « Geomorphology : from expert opinion to modelling »*, Strasbourg, pp. 321-324.

Gaillard D., Delahaye D., Langlois P., Douvinet J. (2008) – Modélisation du ruissellement érosif par automate cellulaire : du diagnostic à l'aménagement concerté. *Revue Internationale de Géomatique*, 3, pp. 305-326.

Gardner M. (1970) – The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game of 'life'. *Scientific American*, 223 (4), pp. 120-123.

Gaucherel C. (2003) – Pertinence de la notion d'indicateur pour la caractérisation du bassin versant, *Espace Géographique*, Editions Reclus, Collection Belin, 3, pp. 265-281.

Gaume E., Livet M., Pons M., (2000) – *Analyse du comportement hydrologique des parties amont des bassins versants lors des crues des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude, les Pyrénées Orientales et le Tarn*. Rapport de synthèse pour le MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), 20 p.

Gaume E., Livet M., Desbordes M. (2003) – Study of the hydrological processes during the Avene river extraordinary flood (south of France): 6 – 7 October 1997, *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, pp. 263 – 267.

Gauvin D. (2000) : *Inventaire des zones sensibles à l'érosion des sols en vallée d'Authie dans une perspective d'application des mesures agri-environnementales*, Mémoire de D.E.S.S. Eau et Environnement", Université de Picardie, 105 p. + annexes et cartes.

Gardner M. (1970) – Mathematical Game. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223, pp. 120-123.

Garry G., (1995) – Auch, Nîmes, Vaison-la-Romaine : retours d'expériences. Bulletin de l'Association des Géographes Français, Paris, pp. 131-145.

Garry G., Ballais J.-L., Masson M. (2002) – La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 5-16.

Gelabert B., Fornos J.J., Pardo J.E., Rossello V.M., Segura F. (2005) – Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65, pp. 139-155.

George P. et Verger F. (2006) – *Dictionnaire de la géographie*. Editions Broché, Paris, 475 p.

Germaine M.-A., Puissant A., Lespez L., Ballouche A. (2007) – Analyse spatiale et typologie morphologique des petites vallées bas-normandes. *Revue Internationale de Géomatique*, 3-4, Informations Géographiques, 17 p.

Ghio M. (1995) – Les activités humaines augmentent-elles les crues ? *Annales de géographie,* Editions Armand Colin, Paris, 581-582, 104, pp. 119-147.

Giannoni F., Roth G., Rudari R. (2000) – A semi-distributed Rainfall-Runoff Model Based on a Geomorphologic approach. *Phys. Chem. Earth (B),* 25 (7-8), pp. 665-671.

Giannoni F., Roth G., Rudari R. (2005) – A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. *Advances in water resources*, 28, pp. 567-581.

Gout J.-P. (1993) – *Prévention et gestion des risques majeurs*. Editions Eyrolles, Collection Ecosciences et technologies, 300 p.

Govers G. (1991) – Time-dependency of runoff velocity and erosion: the effect of initial soil moisture profile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, pp. 713-729.

Gray M. (1971) – Interrelationship of watershed characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 66, pp. 1215–1223.

Gray D. M., Wigham J.M. (1972) – Etude générale du ruissellement et de la precipitation, in GRAY D.M. (eds), *Manuel des principes d'hydrologie*, chap. VII, Publications du Comité National Canadien de la Décennie d'Hydrologie Internationale, Conseil national des recherches du Canada, Ottawa, Canada.

Gravelius H. (1914) – Grundriβ der gesamten Gewässerkunde, *in Band 1 : Flußkunde (Compendium of Hydrology, vol. 1, Rivers* (in German), Goschën, Berlin, Germany.

Gregory K. J., Walling D. E. (1973) – *Drainage basin form and process: a geomorphological approach*. Halsted Press Book, Edward Arnold Ltd, London, 458 p.

Grohmann C.H. (2004) – Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. *Computers & Geosciences*, 30, pp. 1055-1067**.**

Gupta V.K., Castro S.L., Over T.M. (1996) - On scaling exponents of spatial peak flows from rainfall and river network geometry. *Journal of Hydrology*, 187, pp. 81-104.

Gupta V. K., Waymire E. (1983) – On the formulation of an analytical approach to hydrologic response and similarity at the basin scale. *Journal of hydrology*, 65, 95-123.

Gupta V.K., Mesa O.J. (1988) – Runoff generation and hydrologic response via channel network geomorphology; recent progress and open problems. *Journal of hydrology,* 102, pp. 3-28.

H

Hack J.L. (1957) – Studies of longitudinal profiles in Virginia and Maryland. *United States Geological Survey Profession Paper* (USGSPP), 294, pp.

Hack J. T. (1973) – Stream-profile analysis and stream-gradient index. *United States Geological Survey Journal of Research*, vol. 1, pp. 421-429.

Hagestrand T. (1957) – Migration and area. *Lund Studies Series in Geography*, série B, 13.

Hagett P. (1973) – *L'analyse spatiale en géographie humaine*. Editions Armand Colin, Collection U, Paris, 390 p.

Harlin J. M. (1984) – Watershed morphometry and time to hydrograph peak. *Journal of Hydrology*, 67, pp. 141-154.

Hauchard E., Delahaye D., Frankhauser P. (1999) - Analyse morphologique des talwegs et comportement scalant. Applications des dynamiques non entières à la géographie physique. *L'espace géographique*, Editions Reclus, Collection Belin, 3, pp. 215-224.

Hauchard E. (2001) : *De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie – Application aux bassins versants de la marge Nord-occidentale du Bassin de Paris*, Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 3 Volumes, 730 p.

Hauchard E. (2002) – *Plan de Prévention des risques d'inondation par débordement et ruissellement : méthodologie pour la définition de l'aléa ruissellement – approche hydrogéomorphologique*, Université de Rouen, MTG, DDE, 103 p.

Hauchard E., Delahaye D., Fréiré-Diaz S. (2002a) – Organisation fractale de l'occupation du sol : conséquences sur le ruissellement et la ravinement dans les terres de grande culture. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, pp. 181-196.

Hauchard E., Laignel B., Delahaye D. (2002b) – Proposition d'un nouveau schéma structural du Nord-Ouest du bassin de Paris reposant sur l'analyse fractale des réseaux de thalwegs et les données récentes de la géologie régionale. *Comptes Rendus Géosciences*, 4, pp. 296-302.

Hay C. (1998) – *L'inondation du 16 juin 1997 à St Martin de Boscherville : de la survenance du risque à la mise en place d'une politique de prévention* – Mémoire de maîtrise, Rouen, 180 p.

Hay-Lepêtre C. (2005) – *Dynamiques spatiale et temporelle de l'aléa inondation : De l'analyse des phénomènes à l'évaluation des pratiques d'aménagement : L'exemple de la Seine-Maritime.* Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 530 p.

Hernadez-Encinas L., Hoya-White S., Martin del Rey A., Rodriguez-Sanchez G. (2007) – Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, 31 (6), pp. 1213-1227.

Heudin J.-C. (1998) – *L'évolution au bord du chaos*. Editions Hermès, Sciences, Paris, 230 p.

Hessel R., Jetten V., Baoyuan L., Yan Z., Stolte J. (2002) – Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. *Catena*, 54, pp. 235-254.

Hirsch T. (1962) - Méthode de prévision des débits des cours d'eau par l'analyse morphométrique des réseaux fluviatiles, *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 13, pp. 97-108.

Hogeweg P. (1988) – Cellular automata as a paradigm for ecological modeling. *Applied mathematics and computation*, 27, pp. 81-100.

Horton R.E. (1932) : Drainage basins characteristics*, Transaction American Geophysical Union (TAGU),* 13, pp. 350-361.

Horton R.E. (1945) : Erosional development of streams and their drainage basins ; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the Geological Society of America (BGSA),* 56, pp. 275–370.

Houet T. (2006) – *Occupation du sol et gestion de l'eau : la prise en compte de l'espace dans les etudes prospectives*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2, 370 p.

Hubert G., De Vanssay B. (2005) – *Le risque inondation et la cartographie réglementaire – Analyse de l'efficacité, des impacts et de l'appropriation locale de la politique de prévention.* Rapport Evaluation et Prise en compte des Risques naturels et technologiques, MEDD, 188 p.

Hubert-Moy L., Cotonnec A. Le Du L., Chardin A., Perez P. (2001) – A comparison of classification procedures of remotely sensed data applied on landscape units. *Remote sensing of Environment*, 75 (2), pp. 174-187.

HYDRATEC (1999) – Etude pour la maîtrise des eaux de ruissellement et de l'érosion des sols sur les bassins versants des cours d'eau du Vexin-Thelle et des Sablons. Rapport d'étude, 3 tomes, 200p.

HYDRATEC (2001) – Etude pour les protections contre les inondations d'Epaux-Bézu et de Buire, Rapport d'étude, 48p

I

Ibbitt R. P. (1997) – Evaluation of optimal channel network and river basin heterogeneity concepts using measured flow and channel properties. *Journal of hydrology*, 196, pp. 119-138.

Ibbitt R., Woods R. (1997) – Re-scaling the topographic index to improve the representation of physical processes in catchment models. *Journal of hydrology*, 293, pp. 205-218.

Ibisate A. (2004) : Analisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del rio Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas, *Boletin de la Asociacion de Geografias en Espana,* 38, pp. 311-320.

IFEN *(Institut Français de l'Environnement*) (2004) – *Inondations récentes – quelques éclairages*. Editions Les données de l'environnement, 92, 4p.

IFEN (*Institut Français de l'Environnement*) (2005) – Les changements d'occupation des sols de 1990 à 2000 : plus d'artificiel, moins de prairies et de bocages. *Les données de l'environnement*, 101, 4p.

IGE (*Inspection Générale de l'Environnement*) (2001) – *Inondations et coulées boueuses en Seine-Maritime. Propositions pour un plan d'action.* Rapport d'expertise, 70 p.

Iovine G., D'Ambrosio D., Di Gregorio S. (2005) – Applying genetic algorithms for calibrating a hexagonal cellular automata model for the simulation of debris flows characterized by strong intertial effects. *Geomorphology*, 66, pp. 297-303.

Ivanov V.Y., Vivoni E.R., Bras R.L., Entekhabi D. (2004b) - Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: a fully-distributed physically-based approach. *Journal of hydrology*, 298, pp. 80-111.

J

Jacob N., Gob F., Bravard J.-P., Petit F. (2006) – Les formes fluviales d'une rivière en gorge, le Chassezac (Cévennes, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement,* 1, pp. 3-22.

James P.-M. (2007) - An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, pp. 17-42.

Jansa A., Martinez C., Campins J., Genoves A. (2007) – Atmospheric patterns for Mediterranean heavy rains. *Abstracts of the 9th EGU Plinius Conference,* p. 16.

Jarry F. (1987) – *Le ruissellement sur les terres agricoles, approche par simulation de pluies par télédétection.* Thèse de Géographie, Université Paris 7, 276 p.

Jaziri W. (2004) - *Modélisation et gestion des contraintes pour un problème d'optimisation sur-contraint : Application à l'aide à la décision pour la gestion du risque de ruissellement.* Thèse de Géographie, Université de Rouen, 230 p.

Jena S. K., Tiwari K.N. (2006) – Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. *Journal of Hydrology,* 319, pp. 1–14.

Jetten V., Boiffin J., De Roo A. (1996) – Defining monitoring strategies for runoff and erosion studies in agricultural catchments : a simulation approach. *European Journal of Soil Science*, 47 (2), pp. 579-592.

Jimenez-Hornero, F.J., Giraldez, J.V., Laguna, A. (2004) – Estimation of the role of obstacles in the downslope soil flow with a simple erosion model: the analytical solution and its approximation with the Boltzmann model. *Catena*, 57, pp. 261-275.

Jiongxin X. (1999) - Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China. *Catena* , 36,. 1-19.

Joannon A. (2004) – *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie.* Thèse de Doctorat à l'INA-PG, INRA SAD, 393 p. + annexes.

Joannon A., Papy F., Martin P., Souchère V. (2005) – Planning work constraints within farms to reduce runoff at catchment level, *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 11, pp. 13-20.

Jovanovic, P. S. (1940) – Les Profils Fluviatiles en Long, leurs Formes et leur Genèse : Essai de méthodes morphogénétiques nouvelles ». cité in Zavoianu I. (1985) - *Morphometry of drainage basins.* Developments in water science, 20, 238p.

K

King D., Hardy M., Le Bissonnais Y. (1991) - *Evaluation spatiale de la sensibilité à l'érosion hydrique des terres agricoles de la région Nord - Pas de Calais*, INRA, Conseil régional de la région Nord - Pas de Calais, 208 p.

King D., Le Bissonnais Y, Hardy R., Eimbeck M. (1992) – Combinaison spatiale d'informations pour l'évaluation des risques de ruissellement à l'échelle régionale. *Gestion de l'espace rural et Système d'Information Géographique.* INRA (Eds), pp. 149-166.

Kirkby M. J. (1976) – Tests of the random network model and its application to basin hydrology. *Earth, Surfaces and Processes,* 1, pp. 197-212.

Kirkby M.J., Bracken L.J., Shannon J., (2005) – The influence of rainfall distribution and morphological factors on runoff delivery from dryland catchments in SE Spain, *Catena*, 62, pp. 136-156.

Klein C. (1975) – *Massif armoricain et Bassin Parisien. Contribution à l'étude géologique et géomorphologique d'un massif ancien et de ses enveloppes sédimentaires.* Thèse d'Etat en 2 volumes, 745 p., 834 p. + 1 volume de cartes.

Kouabenan D. R. (2007) - Incertitudes, croyants et management de la sécurité. *Le travail humain*, 3, pp. 271-287.

http://www.cairn.info/article.php?ID_ARTICLE=TH_703_0271

Kumar R., Kumar S., Lohani A. K., Nema R. K, Singh R. D. (2000) – Evaluation of geomorphological characteristics of a catchment using GIS. *GIS India*, 9 (3), pp. 13-17.

Kyselý J., Huth R. (2006) – Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 85, pp. 19-36.

L

La Barbera P., Rosso R. (1989) – On the fractal dimension of channel networks. *Water Resources Research*, 25, pp. 735-741.

La Barbara P., Roth G. (1994) – Invariance and scaling properties in the distribution of contributing area and energy in drainage network. *Hydrological processes*, 8, pp. 125-135.

Lajoie G. (2005) – Modélisation et prospective territoriale : Jeux et enjeux de la modélisation du système spatial de l'île de la Réunion. *In* **Guermond Y.** (Eds) - *Modélisations en géographie – Déterminismes et complexités.* Collection IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Paris, Lavoisier, pp. 107-136.

Lajoie G., Hagen-Zanker A. (2007) – La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la perspective territoriale. *Cybergéo*, 405, http://www.cybergeo.eu/index11882.html

Laganier R., Piquet P., Salvador P.-G., Scarwell H.-J. (2000) - Inondations, territoire et aménagement: l'évolution de la prise en compte du risque inondation dans la vallée de la Canche (Pas-de-Calais, France), *Géocarrefour,* , Lyon, pp. 375-382.

Laganier R. (2002) – *Recherche sur l'interface eau et territoire dans le Nord de la France*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, USTL Lille 1, 2 volumes, 250p. + 170p.

Lahousse P. (1997) - L'apport de l'enquête historique dans l'évaluation des risques morphodynamiques : l'exemple de la vallée de la Guisane (Hautes-Alpes, France). R*evue de géographie alpine*, 1, p. 53-60.

Lahousse P., Pierre G., Salvador P.G. (2003) - Contribution à la connaissance des vallons élémentaires du nord de la France: l'exemple de la creuse des fossés (Authieule, plateau picard). *Quaternaire*, 14, pp. 189– 196.

Laignel B. (1997) – *Les altérites à silex de l'Ouest du bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, BRGM, Orléans, 219 p.

Lambert R. (1996) : *Géographie du cycle de l'eau,* Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse, 439 p.

Langlois P. (1994) – Formalisation des concepts topologiques en géomatique. *Revue Internationale de Géomatique*, 4 (2), pp. 181-205.

Langlois P., Delahaye D. (2002) – « Ruicells », automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, 12 (4), pp. 461-487.

Langlois P. (2005a) – Complexité et systèmes spatiaux. *In* **Guermond Y.** (Eds) - *Modélisations en géographie – Déterminismes et complexités.* Collection IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Paris, Hermès-Lavoisier , pp. 299 – 320.

Langlois P. (2005b) – Les automates cellulaires pour la modélisation des systèmes spatiaux. *In Y. GUERMOND* (Eds) - *Modélisations en géographie – Déterminismes et complexités.* Collection IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Paris, Hermès-Lavoisier , pp. 321 – 352.

Langlois P. (2007) – *Fondements théoriques pour la simulation de systèmes complexes en géographie.* Mémoire d'HDR, Habilitations à Diriger les Recherches, Université de Rouen, 241 p.

Lardon S. (1992) – *SIG : nouveaux concepts pour des démarches nouvelles ?* Gestion de l'espace rural et Système d'Information Géographique, INRA Editions, pp. 67-77.

Larue J.-P. (1995) - Contribution à l'étude morpho-dynamique des vallons sarthois (Bassin Parisien, France) au Quaternaire récent. *Norois*, Poitiers, 42 (166), pp. 389-404.

Larue J.-P. (2001) – La morphogenèse accélérée menace-t-elle les régions rurales de l'ouest du Bassin Parisien ? *Géographie Physique et Quaternaire*, 55, pp. 243-255.

Larue J.-P. (2005) – The status of ravine-like incisions in the dry valleys of the Pays de Thelle (Paris basin, France). *Geomorphology*, 68 (2), pp. 242-256.

Latruffe L. (2000) – *Les systèmes d'indemnisation des catastrophes naturelles*. Mémoire de DEA d'Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles, Paris X, Nanterre, 122 p.

Langumier J. (2007) – Le modèle périurbain à l'épreuve de la catastrophe. Ethnographie d'un village du Narbonnais touché par des inondations catastrophiques. *Métropoles, Revue électronique consacrée à l'analyse interdisciplinaire des villes et du fait urbain*, 1, pp. 1-30.

Laurent F., Delclaux F., Graillot D. (1998) - Perte d'information lors de l'agrégation spatiale en hydrologie. *Revue internationale de géomatique*, 8 (1-2), pp. 99-119.

Lavigne F., Suwa H. (2004) – Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 61, pp. 41-58.

Le Bissonnais Y., Le Souder Ch. (1995) – Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et gestion des sols*, 2 (1), pp. 43-56.

Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Gallien E., Eimberck M., Fox D., Martin P., Douyer C., Ligneau L., Ouvry J.-F. (1996) – Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin versant élémentaire agricole. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, pp. 51-69.

Le Bissonnais Y. Gascuel-Odoux C. (1998) – L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré, in STENGEL P. (coord.) – *Sol : interface fragile*, Editions INRA, Paris (211 p.), pp. 129-144.

Le Bissonnais Y, Thorette J., Bardet C., Daroussin J. (2002) – *L'érosion hydrique des sols en France.* Rapport INRA-IFEN, 109 p. (disponible sur http://erosion.orléans.inra.fr/rapport2002/).

Le Bissonnais Y., Martin P. (2004) – Dynamique du ruissellement et de l'érosion diffuse : caractérisation des états de surface des parcelles agricoles et intégration à l'échelle des bassins versants. In **Monestier P., Lardon S., Seguin B.** (Eds) – *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*. INRA Editions, 357 p., pp. 27-43.

Le Bourhis J. P. (2007) – Du savoir cartographique au pouvoir bureaucratique. Les cartes des zones inondables dans la politique des risques. *Genèses*, 68, pp. 75-96.

Le Cerf R. (2008) – *Suivi des changements d'origine anthropiques et climatiques à l'échelle régionale par télédétection – Application à la Bretagne*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2, 350 p.

Lechêne M. (2002) – Remembrement et ruissellement en Seine-Maritime. Utilisation d'un outil de modélisation : STREAM. Rapport d'ingénieur de fin d'études, AREAS, 80 p.

Le Cœur (1996) – *Eléments de géographie physique.* Editions Bréal, Collection Grand Amphi, Premier cycle universitaire, Paris, 416 p.

Lecomte V. (1999) – *Transferts de produits phyto-sanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Processus, déterminisme et modélisation spatiale* Thèse de Doctorat, INA-PG, 212 p. + annexes.

Ledoux B. (2005) – *La gestion du risque inondation*, Editions Lavoisier, Collection Tech et Doc, Paris, 792 p.

Lemarie P. (2007) – *Les forts cumuls plurviomé-triques : quelles logiques spatiales ?* Mémoire de Master I de Géographie, Université de Caen Basse-Normandie, 100 p.

Lemay L. (2000) – *Etude de l'influence de l'océan sur les climats de la France du Nord : Application au bassin versant de la Somme.* Mémoire de DEA, Université des Sciences et Techonologies de Lille (USTL), 110p.

Le Moigne J.-L. (1999) - *La Modélisation des Systèmes Complexes*. Editions Dunod, Paris, 4ème édition, 220 p.

Le Moigne J.L., Morin E. (2007) - *Intelligence de la complexité, Epistémologie et Pragmatique.* Editions de L'aube, Collection Colloque de Cerisy, 457 p.

Leopold L. B., Miller R. L. (1956) - Ephemeral stream-hydraulic factors and their relation to the drainage network. *Union Society of Geological Survey*, Professional Paper, 282-A.

Le Pape S. (1998) – Analyse et quantification du réseau hydrographique – Le réseau hydrographique comme objet vectoriel. Mémoire d'ingénieur, ESGT, Le Mans, 66 p.

Lewin R. (1994) – *La complexité. Une théorie de la vie au bord du chaos*. Editions InterEditions, 235 p.

Lherminez S. (1998) – *Contraintes hydro-climatiques et espace géographique : la gestion des inondations et des orages dans le bassin minier : le cas du Douaisis.* Mémoire de maîtrise, Université des Sciences et Techonologies de Lille (USTL), 130p.

Lhomme J., Bouvier C., Perrin J.-L. (2004) – Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Journal of Hydrology*, 209, pp. 203-216.

Liébault F., Clément P., Piégay H., Rogers C.F., Kondolf G.M., Landon N. (2002) – Contemporary channel changes in the Eygues basin, southern French Prealps: the relationship of sub-basin variability to watershed characteristics. *Geomorphology*, 45, pp. 53-66.

Ligneau L. (1995) – *Etude du bassin versant de Lammerville-Royville*. Rapport AREAS, 36p.

Liu T. (1992) – Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resources Research*, 28, 2981-2988.

Llamas J. (1993) : *Hydrologie générale. Principes et application,* Editions Gaétan Morin, Québec, 2ème édition, 527 p.

Loubier J.C. (2001) – Ecologie et SIG : un outil de gestion patrimoniale appliquée aux espaces naturels touristiques. *Actes du colloque ThéoQuant,* 15 p.

Ludwig B. (1992) – *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du Nord du Bassin Parisien. Analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire.* Thèse de Doctorat, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 155 p.King

Ludwig B., Auzet A.-V., Boiffin J., Papy P., King D., Chadouef J. (1996) – Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigoles de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etude et gestion des sols*, 3 (1), pp. 53-70.

Luo W. (1998) – Hypsometric analysis with a geographic information system. *Computers & Geosciences*, 24 (8), pp. 815– 821.

Luo W., Harlin J. M. (2003) – A Theoretical Travel Time Based on Watershed Hypsometry. *Journal of the American Water Resources Association* (JAWRA), 39 (4), pp.785-792.

M

Malet J.-P (2003) – *Les 'glissements de type écoulement' dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique.* Thèse de Doctorat, Université Louis-Paster, Strasbourg, 364 p.

Maire R. (1996) – L'éclatement actuel de la géographie physique en France : relations avec la Nouvelle Géographie et les sciences de la Terre depuis 1968 ; *Géomorphologie, risques naturels et aménagement.* Hommage à M. Julian, Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, n°38-39, pp. 289-300.

Mandelbrot B. (1985) – *Les objects fractals.* Editions Flammarion, Paris, 212 p.

Manson S.M. (2001) – Simplifying complexity. A review of complex theory. *Geoforum*, 32, pp. 405-414.

Mantilla R., Gupta V.K., Mesa O.J., (2006) - Role of coupled dynamics and real network structures on Hortonian scaling of peak flows. *Journal of Hydrology* XX, pp.1-13

Marie M., Bermond M., Le Gouée P., Delahaye D. (2008) – Intérêts et limites des statistiques agricoles pour l'étude des structures spatiales produites par l'agriculture en Basse-Normandie. *Norois*, Presses Universitaires de Rennes, 207, 2008/2, pp. 21-33.

Martin P. (1997) : *Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du nord ouest de l'Europe*, Thèse de Géographie, INA-PG, INRA SAD, 184 p + annexes.

Martin P., Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J.F. (1997) – Mesure du ruissellement et de l'érosion diffuse engendrés par les pratiques culturales en Pays de Caux (Normandie). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, pp. 143-154.

Massei N., Wang H.Q., Dupont J.-P., Rodet J., Laignel B. (2003) - Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *Journal of hydrology,* 275, pp. 109-121.

Masson F.X. (1987) – L'érosion des terres agricoles dans la région du Nord-Pas-de-Calais. *Terres et hommes du Nord,* 3, pp. 139-145.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'environnement) (2001) – Inondations et coulées de boue en Seine-Maritime. Rapport de l'IGE, Inspection Générale de l'Environnement, 70 p. + annexes.

Mathieu R., King C., Le Bissonnais Y. (1997) - Contribution of multi-temporal SPOT data to the mapping of a soil erosion index. The case of loamy plateaux of northern France. *Soil Technology,* 10, pp. 99-110.

Mathot P., Mariani T. (1994) – *Rapport de la Commission d'enquête sur les causes des inondations et les moyens d'y remédier. Tome I,* Rapport de l'IGE, Inspection Générale de l'Environnement, *Les documents d'Information,* 58, 136 p.

Maucorps J. (1986) – Estimation spatiale des risques de dégradation physique des sols du Nord- Pas de Calais, *Hommes et Terres du Nord,* 3, pp. 145-150.

MEDD, le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (1999) - ***Guide méthodologique PPR : Risques d'inondations*** , La Document Française, Paris, 123 p.

MEDD, le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2003) – *Retours d'expérience des crues de septembre 2002 dans le département du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches du Rhône, de l'Ardèche et de la Drôme.* Huet P., Martin X., Prime J.-L., Foin P., Laurain Cl., Cannard Ph., 133 p + annexe.

MEDD, le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2005) – *Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles.* Rapport de l'Inspection Générale des Finances (IGF), du Conseil Général des Ponts et Chaussées (CGPC), et de l'IGE, l'Inspection Générale de l'Environnement, 95 p. + annexes.

MEDAD, le Ministère de l'Environnement, du Développement et de l'Aménagements Durables (2006) – *Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles.* Cahier de recommandations sur le contenu des PPRs. CARIAM Editions, 40 p.

Melton M. A. (1957) - An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology, Office of Naval Research, technical report n°11.

Melton M. A. (1958) – Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents. *Journal of Geology,* 66, pp. 442–460.

Menabde M., Veitzer S., Gupta V.K., Sivapalan M. (2001) – Test of peak flow scaling in simulated self-similar river networks, *Advances in Water Resources*, 24, pp. 991-999.

Ménard A., Filotas E., Marceau D.J. (2004) – Automates cellulaires et complexité : Perspectives géographiques. *Institut d'Analyse Géographique*, publication électronique www.iag.asso.fr

Ménard A., Marceau D.J. (2006) – Simulating the impact of forest management scenarios in an agricultural landscape of southern Quebec, Canada, using a geographic cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 13 p.

Merle J.-P., Huet P., Martin X., Verrel J.-L., Rat M., Boutin J.-N., Bourget B., Varret J. (2001) – *Inondations et coulées boueuses en Seine-Maritime. Proposition pour un plan d'action.* Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Aménagement, 130 p.

Mérot Ph. (1988) – Les zones de source à surface variable et la question de leur localisation. *Hydrologie continentale*, 3 (2), pp. 105-115.

Meschinet de Richemond N. (2003) – *Statut et perception des catastrophes passées : vers une histoire géopolitique des risques naturels,* pp. 138-156, in V. MORINIAUX (coord.), *Les Risques*, Editions du Temps, Nantes, 256 p.

METEO FRANCE, MEDD (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable) (2005) – *Pluies extrêmes sur le Nord de la France.* CD-ROM.

Meunier M. (1993) – *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Etudes Montagne, 1, Editions Cemagref, Antony, 278 p.
Meyer E. (2001) : *Evolution des paysages ruraux et phénomènes d'inondation boueuse en terres de grande culture. Le cas du ru de Senneville (Yvelines)*. Thèse de Doctorat de Géographie, Paris IV, Sorbonne, 413 p.
Mignolet M. (1992) – L'évaluation des politiques régionales : l'exemple des aides à l'investissement, in DERYCKE P.-H. (eds), *Espaces et dynamiques territoriales*. Economica, Paris, pp. 263-290.
Miller V. C. (1953) - A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee, Columbia, Columbia University Department of Geology, Technical Report, 3.
Milton L. E. (1966) - The geomorphic irrelevance of some drainage network laws, *Australian Geographical Studies*, 4, pp. 89-95.
MISE (Mission Interministérielle Spécialisée en Environnement), **AREAS** (Agence Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des sols) (1997) – La crue du 16 Juin 1997 à Saint-Martin-de-Boscherville, Villers-ECalles, Hénouville, Le Houlme. Rapport d'expertise, Préfecture Seine-Maritime, 62 p.
Mita D., Catsaros W., Gouranis N. (2001) – Runoff cascades, channel network and computation hierarchy determination on a structured semi-irregular triangular grid. *Journal of Hydrology*, 244, pp. 105-118.
Monod J. (1970) – *Le Hasard et la nécessité – Essai pour une philosophie naturelle de la biologie moderne*. Editions Points, Essais, Paris, n° 43, 244 p.
Moniod F. (1983) – Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, XX (3-4) pp. 191-203.
Montgomery D. R., Dietrich W. E. (1988) – Where do channels begin? *Nature,* 336, pp. 232-234.
Montgomery D. R., Dietrich W. E. (1992) – Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science,* 255, pp. 826-830.
Montz B.E., Grunfest R. (2002) - Flash flood mitigation: recommendations for research and applications, *Environ. Hazards,* pp 1–15.
Morakdhani H., Hsu K., Gupta H. V, Sorooshin S. (2004) – Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neuronal networks. *Journal of hydrology*, 295, pp. 246-262.
Morin E. (1997) – *La méthode*, Editions Dunod, Paris, 125 p.
Moriniaux V. (2003) – *Les risques*. Editions du temps, collection Questions de Géographie, 255 p.
Morisawa M. (1958) – Measurement of drainage-basin outline form, *Journal of Geology*, 66, pp. 587–91.
Morisawa M. (1959) – Relation of morphometric properties to runoff in the Little Mill Creek, Ohio, drainage basin. Technical report, University of Columbia, Department of geology, New York, 17 p.
Moron V. (1990) – *Contribution à l'étude de la variabilité climatique mensuelle en Europe*. Mémoire de DEA (non publié), Université de Bourgogne, 75 p.
Moussa E. (1991) – *Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique. Application au bassin du Gardon d'Anduze*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II, 259 p.
Moussa R. (1993) - Modélisation hydrologique spatialisée et Système d'Information Géographique. *La Houille Blanche*, 5, pp. 293-301.
Moussa R., Bocquillon C. (1996) - Fractal analysis of tree-like channel networks from digital elevation model data. *Journal of hydrology*, 187, pp.157-172.
Moussa R. Volt M., Andrieux P. (2002) – Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16 (2), pp. 393–412.
Moussa R. (2003) – On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response. H*ydrological Processes*, 17, pp. 33-58.
Mueller J.E. (1973) - Re-evaluation of the relationship of master streams and drainage basins reply. *Bulletin of the Geological Society of America (BGSA)*, 84 (9), pp. 3127-3130.
Muller A.. (2006) – *Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France*. Thèse de Statistiques appliquées et Hydrologie, Université de Montpellier II, 246 p.
Murray A.B., Paola C. (1994) - A cellular model of braided rivers. *Nature*, 371, pp. 54–57.

N

Najani M.N. (2003) – Watershed modeling of rainfall excess transformation into runoff, *Journal of Hydrology*, 270, pp. 273-281.
Nasri S. Cudennec C. Albergel J., Berndtsson R. (2004) – Use of a geomorphological transfer function to model design floods in small hillside catchments in semiarid Tunisia. *Journal of hydrology*, 287, pp. 197-213.
Nearing M. A. Jetten V., Baffaut C., Cerdan O., Couturier A., Hernandez M., Le Bissonnais Y., Nichols M. H., Nunes N. J., Renschler C. S., Souchere V., Van Oost K. (2005) – Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and land cover, *Catena*, 61, pp. 131-154.
Neppel L. (1997) – *Etude du risque pluvial en région Languedoc-Roussiillon : caractérisation de l'aléa pluviométrique*, Thèse de Doctorat, Montpellier II, 272 p.
Neppel L., Vinet F., Bouvier C., Desbordes M. (2002) – Pluies extrêmes et changement climatique : quelques éléments de réflexion pour la région Languedoc-Roussillon, *Agropolis*, Montpellier.

Neppel L. (2003) – *Analyse de l'épisode pluvieux du 08 au 09 septembre 2002 dans le Gard*. Rapport au Ministère de l'Aménagement et du Territoire, DPPR.DRM, Juin 2003, 27 p.
Nicholas A.P. (2005) – Cellular modelling in fluvial geomorphology. *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 30, PP. 645-649.
Nunes N.J. (2003) – Evaluating the MEFIDIS model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events. *Catena*, 61, pp. 210-228.

O

O'Donnell S. (2002) - Weather Radar Enhanced Flash Flood Forecasting, *Proc. of the Open Source GIS* – Conférence des utilisateurs du logiciel GRASS, 11-13 Sept. 2002, Trento, Italy, 8 p.
Oguz B. (2001) – Mean Instantaneous Unit Hydrographs of Random Channel Networks. *Turk. J. Engin. Environ. Sciences*, 25, pp. 117-126.
Ollinger N. (2002) – *The quest for small universal cellular automata*, International Colloquium on Automata, Languages and Programming, Lecture Notes in Computer Science, pp. 318-330.
O'Sullivan D. (2001) – Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models. *Geographical Analysis,* 33 (1), pp. 1-18.

P

Palacios-Vélez O. L., Gandoy-Bernasconi W., Cuevas-Renaud B. (1998) - Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models. *Journal of hydrology*, 211, pp. 266-274.
Papadakis P., Kazan N. (1986) – Time of concentration in small rural watersheds. Technical report, Université de Cincinatti, Ohio, 68 p.
Papy F., Douyer (1988) – Les déterminants des catastrophes liées au ruissellement des terres agricoles en Pays de Caux. Editions de l'Institut National de Recherche Agronomique, 44 p.
Papy F., Boiffin J., Douyer (1988) – Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. Tome II : Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie,* INRA, 8, pp. 745-756.
Papy F., Douyer C. (1991) – Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie*, 11, pp. 201-215.
Papy F. (2004) – Rôle du découpage parcellaire dans la maîtrise du ruissellement érosif : les leçons d'une étude comparée de situations. In **Monestier P., Lardon S., Seguin B.** (Eds) – *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*. INRA Editions, 357 p., pp. 9-12.
Parott L. (2002) – Complexity and the limits of evological engineering. *Transactions of the ASAE*, 45, pp. 1697-1702.
Peguy Ch. P. (1942) - Principes de morphométrie alpine. *Revue Géographique Alpine,* 2, pp. 453-486.
Pédélaborde P. (1957) – *Le climat du Bassin Parisien, essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*. Paris, 539 p. + atlas.
Peulvast J.-P., Vanney J.-R. (2001) – *Géomorphologie structurale : Terre, corps planétaires solides – Tome 1, Relief et structure.* SGF, Collection Géosciences, 505 p.
Phipps M. (1989) – Dynamical behaviour of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence. *Geographical Analysis,* 21, PP; 197-215.
Phipps M., Langlois P. (1997) : *Automates cellulaires- Application à la simulation urbaine*, Editions Hermès, Collection sciences, Paris, 208 p.
Piégay H., Schumm S.A. (2003) – Systems approachs in fluvial geomorphology, in KONDOLF M.G. et PIEGAY H. (eds), *Tools in fluvial geomorphology*, J.Wiley ans Sons, Chichester, UK, pp. 3-22.
Pierson T. C., Costa J. E. (1987) - A rheological classification of subaerial water-flows. *Geological society of America, Reviews in Engineering Geology*, 7, pp. 1-12.
Pigeon P. (2002) – Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, 111 (627-628), pp. 452-470.
Pigeon P. (2003) - L'intérêt du risque pour l'enseignement de la géographie. *In Les risques*, Collection Questions de Géographie, Editions du Temps, pp. 9-21.
Pinchemel Ph. (1954) – *Les plaines de craie du nord-ouest du Bassin Parisien au sud-est du Bassin de Londres et leurs bordures*. Editions Armand Colin, 505 p.
Planchon O. (2005) – Les printemps pluvieux des années 1980 : retour sur une particularité météorologique et climatique de la fin du vingtième siècle en Europe occidentale. *Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Gênes, pp. 349-352.

Plantier M. (2003) - *Prise en compte de caractéristiques physiques du bassin versant pour la comparaison des approches globale et semi-distribuée en modélisation pluie-débit,* Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg, rapport Cemagref, 94 p.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C., (2003) – Gully erosion and environmental change: importance and research needs, Catena, 50, pp. 91–133.

Pottier N. (2000) – Risques d'inondation, réglementations et territoires. *Hommes et Terres du Nord*, 2, pp. 93-101.

Pradier S. (2002) – *Caractéristiques de l'écoulement et des précipitations observés durant MAP : une analyse par radar et simulation numérique.* Thèse de Doctorat en Aérologie, Université Paul Sabatier, Toulouse, 223 p.

Probst J. (1995) - *Le risque inondation dans le département de l'Eure.* Mémoire de maîtrise, Université de Rouen, 200p.

Puech C. (1993) – *Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants – applications à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropical sèche*. Thèse de Doctorat, Grenoble, 217 p.

Puech C. (2000) – *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*. Habilitations à Diriger les Recherches, Montpellier, 105 p.

Puissant A. (2003) – *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*. Thèse de Doctorat, ULPS, Université Louis-Pasteur, Strasbourg 1, 447 p.

Pumain D., Saint Julien Th. (1997) – *L'analyse spatiale ; 1/ Localisation dans l'espace*. Collection Cursus, Editions Armand Colin, Paris, 162 p.

Pumain D. (2003) - Une approche de la complexité en géographie. *Geocarrefour*, 78, 1, pp. 25-31.

Pumain D. (2006) – *Lois d'échelle et mesure des inégalités en géographie.* Texte soumis lors de la réunion du Groupe Raison et rationalités, 11p.

Q

Quesnel F. (1997) – *Cartographie numérique en géologie de surface. Applications aux altérites à silex dans l'Ouest du bassin de Paris*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, BRGM, Orléans, 255 p.

R

Reddy G. P. O., Maji A. K., GajbhiyeE K. S. (2004) – Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India – a remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information,* 6, pp. 1-16.

Réméniéras R. (1986) – *Hydrologie de l'ingénieur*. Editions Eyrolles, Paris, 456 p.

Renshler C. S., Harbord J. (2002) – Soil erosion assessment tools from point to regional scales – the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology,* 4, pp. 189-209.

Rigon R., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Ijjasz-Vasquez E., Bras R. L. (1993) – Optimal Channel Networks: a framework for the study of river basin morphology. *Water Ressources Research*, 29 (4), pp. 1635-1646.

Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Rigon R., Bras R. L., Ijjasz-Vasquez E. J., Mariani A. (1992) - Minimum energy and fractal structures of drainage networks. *Water Resources Research,* 28, pp. 2183–2195.

Ritter C. (1826) – De la position géographique et de l'extension des continents (Discours pronounce le 14 décembre 1826), pp. 103-132, *in* RITTER C. (1974), *Introduction à la géographie générale comparée*. Paris, Les Belles Lettres, 255 p.

Rodriguez-Iturbe I., Valdes J.-B. (1979) – The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research,* 15 (6), pp. 1409–1420.

Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. Rigon R., Bras R.L., Marani A., Ijjasz-Vasquez R. (1992) - Energy dissipation, runoff production and the three-dimensional structure of river basins. *Water Resources Research,* 28, 1095-1103.

Rodriguez-Iturbe I, Rinaldo A. (1997) – *Fractal River Basins, chance and self-organization*. Cambridge University Press, Cambridge, 547 p.

Rozada A.S. (1998) – *Analyses spatiales et diachroniques de l'aléa inondation en Seine-Maritime entre 1960 et 1998.* Mémoire de maîtrise, Université de Rouen, 203 p.

Ruin I., Lutoff C. (2004) – Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise. *La Houille Blanche*, 6, pp. 114-119.

Ruin I., Gaillard J.-C., Lutoff C. (2007) – How to get there? Assessing motorists' flash flood risk perception on daily itineraries. *Environmental Hazards*, 7, pp. 235-244.

RUR'EAUX (1994) – Rapport sur la lutte contre les inondations boueuses par la maîtrise du ruissellement à St Aubin et Sélens (02). Rapport du Conseil Régional de Picardie et du bureau d'études Rur'eaux, 30p.

S

Saam M. (1998) – *Analyse SIG et caractérisation écologique des bassins versants de petits plans d'eau en relation avec leur biodiversité*. Mémoire de maîtrise, LEBA, Université de Genève, 143 p.

Salomon J.-N. (1997) - *L'homme face aux crues et aux inondations.* Presses Universitaires Bordeaux, Collection Scieteren, Bordeaux, 136 p.

Sanders, L., Pumain D., Mathian H., Guérin-Pace F., Bura S. (1997) – SIMPOP: A multiagent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B,* 24, pp. 287-305.

Sanders L. (2000) - *La place de l'explication dans l'analyse spatiale*, Actes du colloque Géopoint « *Géographie et explication* », 29-30 mai, Avignon.

Sanders L. (2001) : *Les modèles en Analyse Spatiale*, collection IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire), Paris, Hermès-Lavoisier, 329 p.

Sarkar C., **Abbasi S. A.** (2006) - Cellular automata-based forecasting of the impact of accidental fire and toxic dispersion in process industries. *Journal of Hazardous materials*, A 137, pp. 8-30.

Scheidegger A. E. (1966) - Stochastic branching processes and the law of stream orders. W*ater Resources Research*, 2 (2), pp. 199-203.

Schmidt J., Dikau R. (2000) - Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - Semantics, methods, future needs. In DIKAU R., SAURER H. (eds.) - *GIS for Earth Surface Systems - Analysis and Modelling of the Natural Environment*. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 153-173,

Schmidt J., Merz B., Dikau R. (1998) – Morphological structure and hydrological process modelling. *Zeitschrift furGeomorphologie*, N.F., Supplement Band 112, pp. 55-66.

Schumm S.A., (1956) - Evolution of Drainage System and Slopes in Badlands at Perth Ambay, New Jersey, *Bulletin of Geological Society of America (BGSA)*, 67, pp. 597-646.

Serrat P., Depraetere C. (1997) – Incidences de facteurs géomorphologiques dans le fonctionnement d'un bassin en situation de crue : l'exemple de l'Agly (Pyrénées Orientales). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 73-88.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. (2002) – Fundamental quantitative methods of land surface analysisI *Geoderma*, 107, pp. 1-32.

Shreve R. L (1966) – Statistical law of stream numbers. *Journal of Geology*, 74, pp. 17-37.

Shreve R. L (1967) – Infinite topologically random channel networks. *Journal of geology*, 75, 178-186.

Shreve R. L. (1974) – Variation of mainstream length with basin area in river networks. *Water Resources Research,* 10 (6), pp. 1167-1177.

Sivapalan M., Jothyangkoon C, Menabde M. (2002) – Linearity and nonlinearity of basin response as a function of scale: discussion of alternative definitions. *Water Resources Research,* 38 (2), pp. 41–45.

Smart J. S. (1968) – Statistical properties of stream lengths. *Water Resources Research,* 4 (5), pp. 1001-1014.

Smart J. S. (1981) – Links length and channel network topology. *Earth, Surface, Processes and Landforms,* 6,. 77-79.

Snell J., Sivapalan M, Bates M. (2004) – Nonlinear kinematic dispersion in channel network response and scale effects: application of the meta-channel concept, *Advances in Water Resources*, 27, pp. 141-154.

Snell J.D., Sivapalan M. (1994) – On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph. *Water Resources Research,* 30 (3), pp. 2311-2323.

Shoshany M., Kelman E. (2006) – Assessing mutuality of change in soil and vegetation patch pattern characteristics by means of Cellular Automata simulation. *Geomorphology*, 77, pp. 35-46.

Souchère V. (1995) – *Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion de talwegs, application à des petits bassins versants du Pays de Caux (Haute-Normandie).* Thèse de Géographie, INAPG, 201 p.

Souchère V., King D. Daroussin J., Papy F., Capillon A. (1998) – Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, 206,. 256-267.

Souchère V., Cerdan O., Ludwig B., Le Bissonnais Y., Couturier A., Papy F. (2003) - Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments. *Catena*, 50, pp. 489-505.

Souchère V., Cerdan O., Dubreuil N., Le Bissonnais Y., King C. (2005) - Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena*, 61, pp. 229-240.

Soulsby C, Tetzlaff D., Rodgers P., Dunn S., Waldron S. (2005) – Runoff processes, stream water residence times and controlling landscape in a mesoscale catchment: An initial evaluation, *Journal of hydrology*, 23, pp. 1-25.

Srinivasan, V. S., Gomes, H. P., Leprun, J. C., Silva I.G. (1988) - Erosion studies in Surne – a semiarid region in the northeast of Brazil, In BORDAS M.P., WALLING D.E. (Eds). - *Sediment Budgets*, Proc. Porto Alegre Symp. Porto Alegre, IAHS Publ, 174, pp. 307-314.

Stark C. P. (1991) – An invasion percolation model of drainage network evolution. *Nature,* 352, pp. 423-425.

Stahl K., Hassler B., Demuth S. (2002) – Scenarios assessing the influence of climate variability on drought in Europe. *Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference*, Cape Town, IAHS, 274, pp. 93-100.

Stefanescu E. (2003) – *Les risques d'inondation et d'écoulements de boue dans la commune d'Essômes sur Marne (02).* Mémoire de maîtrise, Université Paris-Sorbonne (Paris IV), CCRCT, 201 p.

Strahler A.N. (1952a) – Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63, pp. 117-142.

Strahler A.N. (1952b) – Dynamic basis of geomorphology. *Bulletin of the Geological Society of America,* 63, pp. 923–938.

Strahler A.N. (1957) – Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union,* 38, pp. 913-920.
Swiss Re Focus Report (2004) – *Inondations et partenariat public-privé pour la gestion des CatNat.* Rapport d'expertise, Focus Report, 10 p.

T

Takken I., Beuselinck L., Nachtergaele J., Govers G., Poesen J., Begraer G. (1999) – Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena*, 37, pp. 431-447.
Tarboton D. G. (1997) – A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 (2), pp. 309-319.
Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I. (1991) – On the extraction of channel networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 5, pp. 81-100.
Taylor P. (1977) – *Quantitative methods in Geography, an introduction of spatial analysis*. Waveland Press, 386 p.
Thomas M., Gombert P. (1994) – Quelles mesures préventives pour les bassins versants ruraux à réponse rapide ? *Actes du 23eme congrès de la Société Hydrotechnique de France*. pp.771-774.
Thomas N., Nicholas A.P. (2002) - Simulation of braided river flow using a new cellular routing scheme. *Geomorphology*, 43, pp. 179-195.
Tobler W. (1979) – A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46 (2), pp. 234-240.
Tolle F. (2006) – *Paysage et risqué sanitaire. Le cas de l'échinococcose alvéolaire, approche multiscalaire*. Thèse de Doctorant, Université de Besançon, 367 p.
Torrens P. M. (2002) – Cellular automata and multi-agent systems as planning support tools. *In* GEERTMAN I., STILLWELL J. (Eds), *Planning Support Systems in Practice,* Springer-Verlag Ltd, London, pp. 205-222.
Torrens M., Benenson I. (2005) – Geographic Automata Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 19 (4), pp. 385-412.
Tricart J. (1977) – *Précis de géomorphologie. Tome II : Géomorphologie dynamique générale.* Edition SEDES, Paris, 345 p.
Tricart J. (1991) : « Cent ans de géomorphologie dans les annales de géographie ». *Annales de Géographie*, Editions Armand Colin, Paris, 561-562, pp.578-619.
Topin L. (2000) - *Analyse et cartographie des inondations dans le Nord-Pas-de-Calais.* Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille 1, 365 p. + annexes.
Tucker G. E., Catani F., Rinaldo A., Bras R. L., (2001) – Statistical analysis of drainage density from digital terrain, *Geomorphology*, 36, pp. 187-202.

V

Valette G., Prévost S., Lucas L., Léonard J. (2006) – SoDA Project : A simulation of surface soil degradation by rainfall. *Computers and Graphics*, 30, pp. 494-506.
Van De Wiel M. J., Coulthard T.J., Macklin M.G, Lewin J. (2007) – Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, 90, pp. 283-301.
Vandewiele A. (1998) – *Mise en place d'une base de données géographiques afin d'évaluer l'influence de l'évolution du maillage bocager sur les phénomènes de ruissellement et de proposer un schéma d'aménagements linéaires.* Mémoire de maîtrise, Université de Rouen, 232 p.
Veitzer S., Gupta V. K. (2001) - Statistical self-similarity of width function maxima with implications to floods. *Advances in Water Resources,* 24, pp. 955-965.
Veltri M., Veltri P., Maiolo M. (1996) – On the fractal dimension of natural channel network, *Journal of Hydrology,* 187, pp.137-144.
Veyert Y., Garry G. (1998) - Prévenir les inondations. *Pour la science*, 243, pp. 46-53.
Veyret-Mekdjian Y. (2001) - *Géographie des risques naturels.* Collection la Documentation Française, La Documentation photographique, Paris, 8023, 63 p.
Vigneau J.-P. (2004) – Un siècle de « type de temps » : épistémologie d'un concept ambigu. *Norois*, 191, pp. 17-27.
Vinet F. (2003) – *Crues et inondations dans la France méditerranéenne : les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées orientales, Hérault).* Editions du Temps, Nantes, 225 p.
Viaud V. (2004) – *Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de nutriments*. Thèse de Doctorat, ENSAR, Ecole Nationale Supérieur Agronomique de Rennes, 286 p.
Vogt J. V., Colombo R., Bertolo F. (2003) – Deriving drainage network and catchments boundaries as a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology*, 53, pp. 281-298.

Volkert H. (2000) – Heavy precipitation in the Alpine region (HERA) : area rainfall determination for flood warnings through in-situ measurements, remote sensing and atmospheric modelling. *Meteor. Atmos. Phys.*, 72, pp. 73-85.

Von Frisch K. (1971) – *Bees : Their vision, chemical sense and language.*, Cornell University Press, Ithaca and London, 435 p.

Von Neumann J. (1951) – The general and logical theory of automata. *in JEFFRES L. (Eds) Cerebral Mechanisms in Behavior*, John Wiley and Sons, New York, New York, USA, pp.1-41.

W

Weisbuch G. (1989) – *Dynamique des systèmes complexes – Une introduction aux réseaux d'automates,* InterEditions, Paris ; http://www.lps.ens.fr/éweisbuch/livre/livcsd.html

West G. (2006) – Size, scale and the Boat race: conceptions, connections and misconceptions, in PUMAIN D. (Eds) – *Hierarchy in Natural and Social Sciences.*, Springer, pp. 71-80.

White, R., Engelen G., Uljee I. (1997) – The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B*, 24, pp. 323-343.

Wolfram S. (1983) – Statistical Mechanics of Cellular Automata. *Rev. Mod. Phys*, 55, pp. 601-644.

Wolfram S. (1994) – *Cellular Automata and Complexity*, Addison Wesley Publishing Company, Reading, MA.

Wolfram S. (2002) - *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Inc., 1197 p.

Wotling G. (1998) - *Etude de l'aléa pluviométrique à Tahiti*, Cahiers de l'ORSTOM, 74p.

Wood E.F., Sivapalan M., Beven K. (1990) – Similarity and scale in catchment storm response. *Review of Geophysics*, 28 (1), pp. 1-18.

Woods R. A., Sivapalan M. (1997) – A connection between topological driven runoff generation and channel network structure. *Water Resources Research*, 33, pp. 2939-2950.

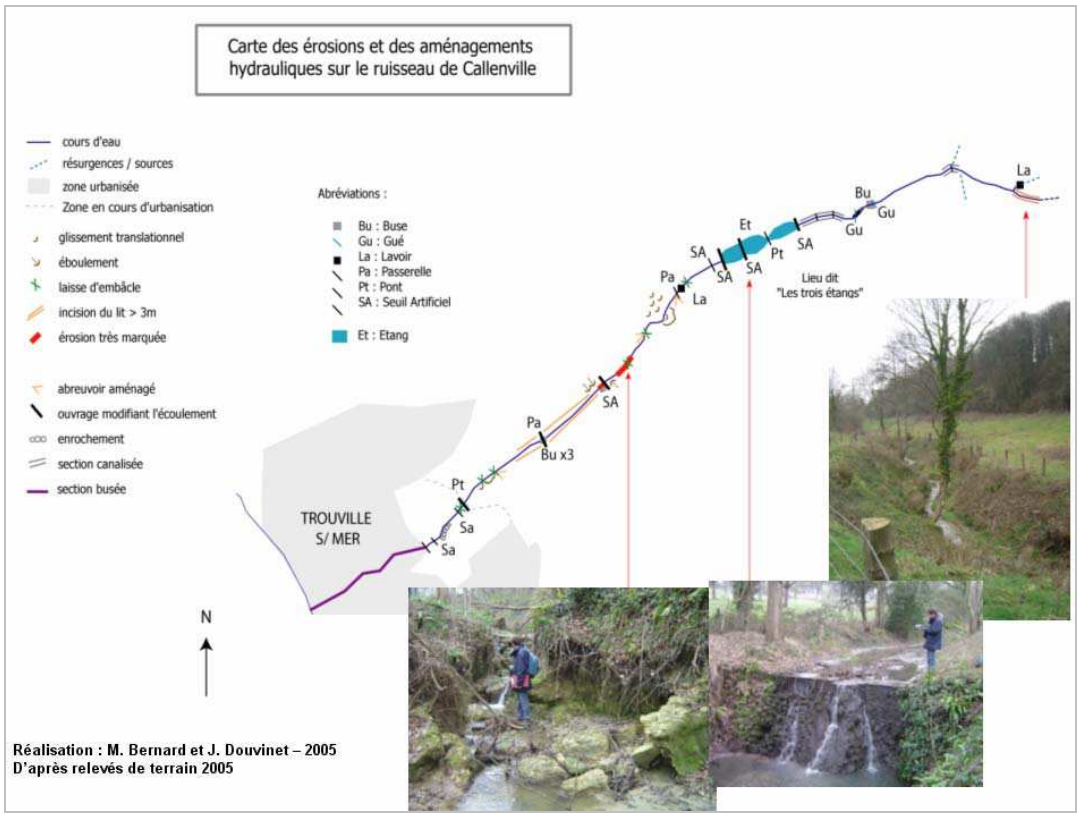
Z

Zavoianu I. (1985) – *Morphometry of drainage basins.* Developments in water science, 20, 238p.

Annexes

Annexe 1.1. Compléments sur l'évènement de Trouville (14) qui a eu lieu le 1er juin 2003.

Les relevés de terrain ont permis de réaliser un diagnostic environnemental pour tous les cours d'eau. Les traces d'érosion, les hauteurs d'incision liées à la crue, les aménagements et les perturbations de la dynamique naturelle des écoulements ont ainsi été identifiés (ici, le Callenville par exemple). Les laisses de crue retrouvées au sein du chenal ont permis une estimation des hauteurs d'eau maximums en utilisant la formule de Manning-Strickler (fig. 1.18.).



Les conséquences matérielles de la crue à l'exutoire de ce petit bassin (2,1 km²) sont importantes à rappeler : routes détruites (dommages estimés à 5,3 M€), une dizaine de voitures emportées, un réseau d'assainissement entièrement détruit à certains endroits, 70 commerces et 300 habitations inondés…

Annexe 2.1. Cotes des archives versées en pré-archivage à la DDSC (état des lieux fin 2005)

Les dossiers, qui sont en *pré-archivage* à la DDSC (*Direction de la Défense et de la Sécurité Civile* (Asnières-sur-Seine) sont présentés ci-dessous. Une fois révisés, les dossiers sont versés aux Archives Nationales (pour une durée de 5 ans) puis ,10 ans après, au CAC (Centre des Archives Contemporaines) pour une durée de 30 ans. Ils sont non communicables au public durant toute cette période.

Versement	Nb Art	Art.	Contenu	Révision
1999003	10	1-10	Commission interministérielle, janvier à avril 1997	2000
2000004	10	1-10	Commission interministérielle, mai à septembre 1997	2000
2000005	10	1-9	Commission interministérielle, octobre à novembre 1997	2000
		9-10	Commission interministérielle, janvier 1998	2001
2000007	10	1-10	Commission interministérielle, janvier à février 1998	2001
2000008	10	1-10	Commission interministérielle, février à avril 1998	2001
2000011	5	1	**Fiches de synthèse**, **commissions de 1997**	**2000**
		2-3	Fiches de synthèse, commissions de 1998	2001
		4-5	Résultats émis par fax aux préfectures pour 1998	2001
2000012	10	1-10	Commission interministérielle, mai à septembre 1998	2001
2000013	6	1-6	Commission interministérielle, octobre à décembre 1998	2001
2000033	10	1-10	Commission interministérielle, janvier à juillet 1999	2002
2000034	8	1-8	Commission interministérielle, juillet à décembre 1999	2002
2000035	10	1-10	Fonds de dossiers, février à novembre 1999	2002
2000036	10	1-6	Fonds de dossiers, novembre à décembre 1999	2002
		6	Ordres du jour	2002
		7	Fiches d'analyse	2002
		8-10	Accusés de réception des dossiers à la cellule et des avis rendus par la commission	2002
2001021	10	1-10	Commission interministérielle, janvier à août 2000	2003
2002001	10	1-6	Commission interministérielle, septembre à décembre 2000	2003
		6-10	Commission de novembre 2000 : dossiers sécheresse (1ère demande)	2003
2002002	7	1-2	Commission de novembre 2000 : dossiers sécheresse (1ère demande)	2003
		2-7	Commission de novembre 2000 : dossiers sécheresse (prorogations)	2003
2002005	17	1-17	Fonds de dossiers, janvier à décembre 2000	2003
2002025	20	1-20	Commission interministérielle, janvier à septembre 2001	2004
2002026	9	1-9	Commission interministérielle, octobre à décembre 2001	2004
		9	Arrêtés 2001 et tableau des avis transmis aux préfectures	2004
2002027	22	1-22	Fonds de dossiers, janvier à décembre 2001	2004
2004018	30	1-18	Commission interministérielle, janvier à décembre 2002	2005
		19-25	Fonds de dossiers, janvier à décembre 2002	2005
		26-27	Avis de la commission, janvier à décembre 2002	2005
		28-30	**Dossiers classés sans suite, années 1996-2000**, 2002	2005
2005041	22	1-22	Commission interministérielle, janvier à décembre 2003	2008
2005044	16	1-12	Commission interministérielle, janvier à décembre 2004	2009
		13-14	Fonds de dossiers, janvier à avril 2003	2008
		15-16	Avis des commissions, janvier 2003 à janvier 2005	2010
TOTAL		**250**		

Annexe 2.2. Quelques rappels sur la procédure d'indemnisation du régime « *CatNat* »

Aspects juridiques

La reconnaissance de l'état de « *catastrophe naturelle* » à l'égard des victimes des sinistres constitue la décision nécessaire pour permettre aux sociétés d'assurance d'indemniser les dommages aux biens. Ce dispositif fait appel à la fois aux pouvoirs publics et aux sociétés d'assurance puisque la Caisse Centrale de Réassurance est habilitée à réassurer les sociétés d'assurance pour les dégâts de catastrophe naturelle en accord avec l'Etat.

La loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 oblige les particuliers à s'assurer contre les risques naturels en ajoutant une prime à leur contrat d'assurance (prime de cotisation additionnelle individualisée de 9% du contrat d'assurance). Les contrats d'assurance garantissent les dommages d'incendie ou tous autres dommages à des biens privés (immeubles et meubles), ainsi que les dommages aux véhicules et aux pertes d'exploitation. Les lois n° 92-665 du 16 juillet 1992, n° 2002-276 du 27 février 2002, n° 2003-699 du 30 juillet 2003 et n° 2004-811 du 13 août 2004 viennent compléter le texte fondateur de 1982.

« *Sont considérés comme les effets de catastrophes naturelles, au sens de la présente loi, les dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises* » (Article L125-1 du Code des Assurances).

Procédure pour une demande de reconnaissance de l'état de « catastrophe naturelle »

La procédure d'indemnisation peut paraître complexe et longue dans le temps puisque les dossiers communaux doivent remonter jusqu'au Ministère de l'Intérieur afin de bénéficier ensuite d'un retour positif ou négatif vers les communes et les assureurs [fig. n° 1]. Juste après la crue, les particuliers ont 5 jours pour transmettre à leur assureur et à la mairie une déclaration mentionnant les dégâts et une estimation des dommages subis (ce qui peut s'avérer plus long dans la réalité). Les Préfectures centralisent ensuite les dossiers de toutes les mairies et les rapports techniques, avant de constituer un dossier qu'elles envoient à la cellule *CatNat* rattachée à la DDSC (Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles) au sein du Ministère de l'Intérieur.

Les dossiers communaux sont complétés par des documents obligatoires sélectionnés par rapport au type de catastrophe concernée :

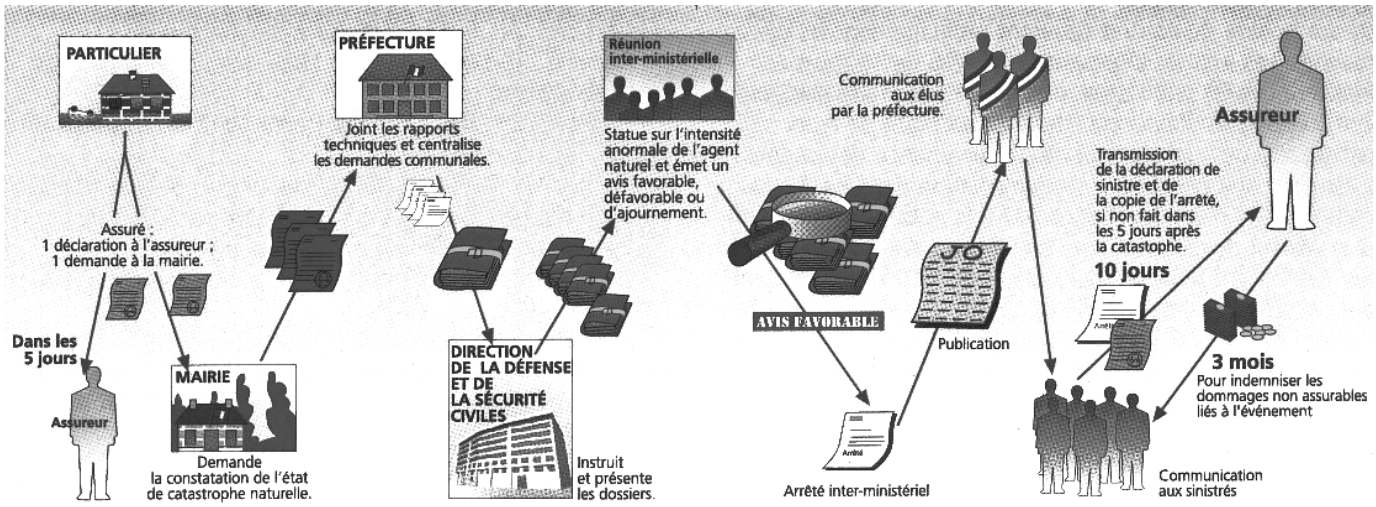
- une fiche d'analyse élaborée par le service ;
- une demande préfectorale ;
- des rapports techniques : suivant la catégorie d'événement, il peut s'agir du rapport de la direction régionale de l'environnement (DIREN), du rapport météorologique (Météo-France), du rapport de la direction départementale de l'équipement (DDE) ou des services techniques communaux, du rapport hydrogéologique du bureau de recherches géologiques et minières, du rapport géotechnique, du rapport nivométéorologique, … etc.) ;
- une demande de reconnaissance communale signée et certifiée par le cachet de la mairie ;
- des cartes géographiques ;
- un rapport circonstancié de la préfecture ;
- des pièces annexes (la liste des communes atteintes, des extraits de registres de délibérations de conseil municipal, et parfois la liste des communes ayant bénéficié d'un arrêté interministériel) ;
- des éléments de dossiers établis par les préfectures et non soumis aux commissions (Ces éléments de dossiers, appelés aussi " *fond de dossier* " par la cellule Catastrophes naturelles, peuvent contenir des rapports de gendarmerie et des services d'incendie de secours, mains courantes, procès verbaux de constat établi par huissier, coupures de presse, télex, dépêches, déclarations des sinistres, avis de crues, devis, factures, inventaires des mobiliers, recensements des calamités publiques, contrats d'assurances, et des photographies des désordres) ;
- l'ensemble des correspondances.

La cellule Catastrophes naturelles est ensuite chargée d'instruire et de regrouper les dossiers de demandes transmis par les Préfectures dans un délai d'un mois. Les dossiers seront par la suite soumis à une Commission Interministérielle composée de représentants des ministères de l'intérieur et de l'économie, des finances et de l'industrie ainsi que d'experts du ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD) et de représentants de la Caisse centrale de réassurance. La Commission, qui se réunit en général une fois par mois, est chargée de se prononcer sur le caractère d'intensité « *anormale* » de l'agent naturel qui ressort des rapports techniques joints aux dossiers. Ainsi, lorsque l'intensité du phénomène est reconnue comme ayant une période de retour supérieure à 10 ans, la décision est positive. Les avis favorables donnent ensuite lieu à la prise d'un arrêté interministériel portant constatation de l'état de catastrophe naturelle publié dans le journal officiel.

« *Cet arrêté détermine les zones et les périodes où s'est située la catastrophe ainsi que la nature des dommages résultant de celle-ci couverts par la garantie. Cet arrêté précise pour chaque commune ayant demandé la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, la décision des ministres. Cette décision est ensuite notifiée à chaque commune concernée par le représentant de l'Etat dans le département, assortie d'une motivation. L'arrêté doit être publié au Journal officiel dans un délai de trois mois à compter du dépôt des demandes à la préfecture. De manière exceptionnelle, si la durée des enquêtes diligentées par le représentant de l'Etat dans le département est supérieure à deux mois, l'arrêté est publié au plus tard deux mois après la réception du dossier par le ministre chargé de la sécurité civile* » (Article L125-1 du Code des Assurances).

Après décision de la Commission Interministérielle, la cellule Catastrophes naturelles prépare et rédige les procès verbaux des avis rendus et les arrêtés. Elle assure également le suivi des contreseings interministériels et leur publication au Journal officiel. Elle informe les Préfectures et les élus de l'avancement de chacune des étapes relatives aux avis, à la signature et à la publication des arrêtés. En théorie, l'instruction du dossier dure entre 5 jours et deux mois. Dans les faits, l'instruction est fonction de la date de réunion de la Commission. Ensuite, les sinistrés munis de la déclaration de sinistre et de la copie de l'arrêté prennent contact avec leurs assureurs qui ont désormais 3 mois pour indemniser les dommages non assurables liés à l'évènement (« *à compter de la date de publication ou de la date de remise de l'état estimatif des biens endommagés* » – L125-2).

La procédure de « *catastrophe naturelle* » est schématiquement représentée ci-dessous (d'après le Ministère de l'Intérieur). Entre la date de l'événement inondation et la prise de décision de l'arrêté, les sinistrés peuvent attendre entre 6 mois et 2 ans.



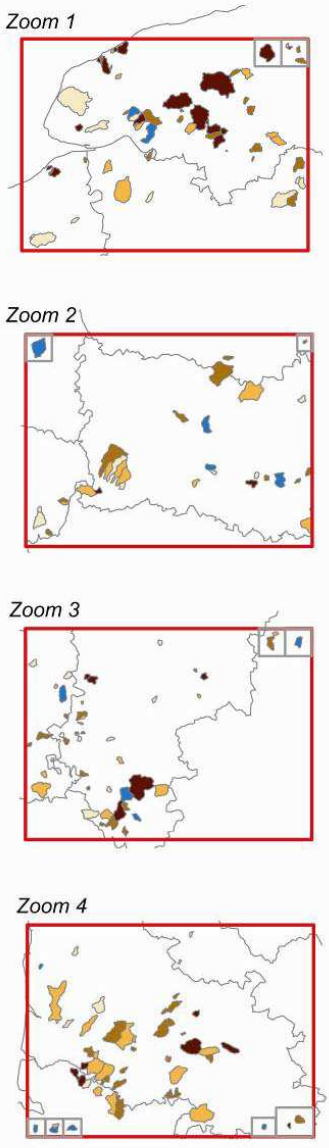
Source : MEDD (2005)

Annexe 3.1. Carte des dommages et natures des sinistres sur les 189 bassins touchés

La zone étudiée a été découpée en quatre parties (ci-dessous) pour faciliter l'analyse de l'ampleur des dégâts, l'importance des coûts matériels et humains, croisés à la récurrence des évènements.

Ampleur des dégâts

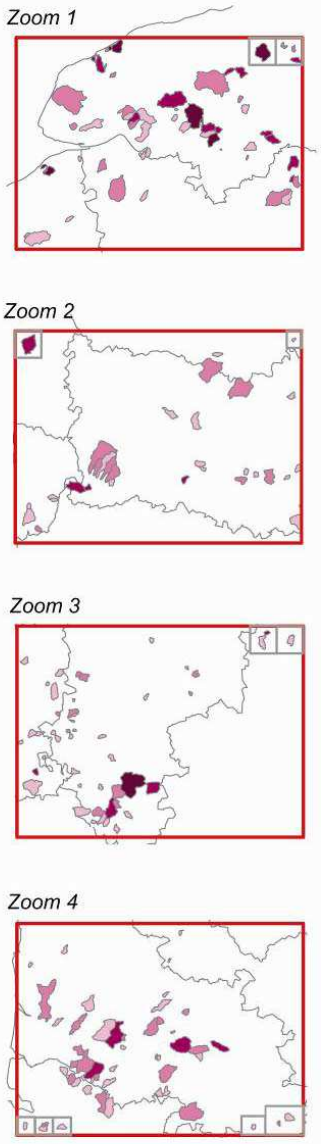
- inondations de caves
- dépôts importants (cailloux / boues / sarments de vignes)
- cours d'eau devenu un torrent
- routes / infrastructures touchées
- voitures détruites / logements saccagés / évacuations



Commentaires : Les BVs les plus touchés se situent en Seine Maritime et au Sud de l'Aisne. Les dépôts de boues gênent la circulation sur les routes du Pas de Calais tandis que les cours d'eau prennent des allures de torrents sans logique spatiale.

Coûts financiers et matériels

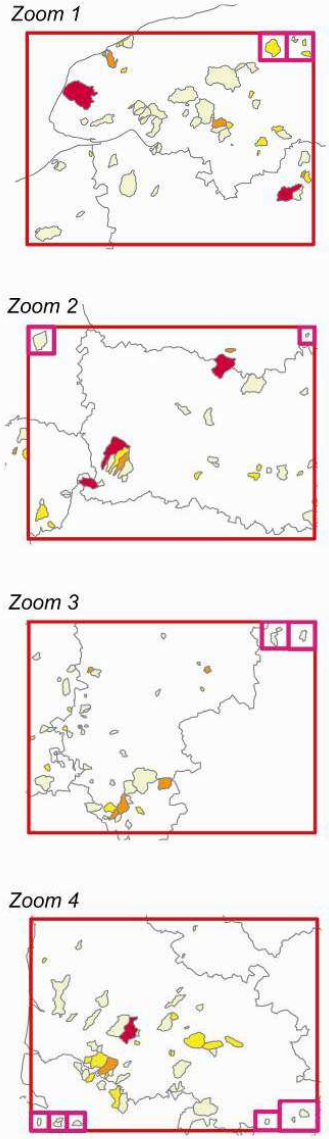
- dégâts à faible coût (< 30K€)
- dommages matériels de 30 à150K€
- dommages matériels >150K€
- dommages matériels >600K€) et/ ou coût humain (décès) et/ou mise en péril et intervention d'urgence.



Commentaires : Les crues coûtent en moyenne moins de 150K€. Elles peuvent cependant prendre des ampleurs dramatiques. Les bassins les plus durement touchés durant ces dernières années se situent en Seine-Maritime.

Récurrence des épisodes

- 1 seul évènement reconnu
- 2 évènements reconnus
- 3 évènements reconnus
- 4 évènements reconnus ou plus (5 étant le maximum)



Commentaires : Les BVs touchés ne le sont en général qu'une seule fois. Les plus fortes récurrences touchent des bassins où les coûts matériels ne sont pas les plus importants ni même où les dommages sont virulents.

Annexe 4.1. Quelques maxima comparés à la normale climatique (1961-1990).

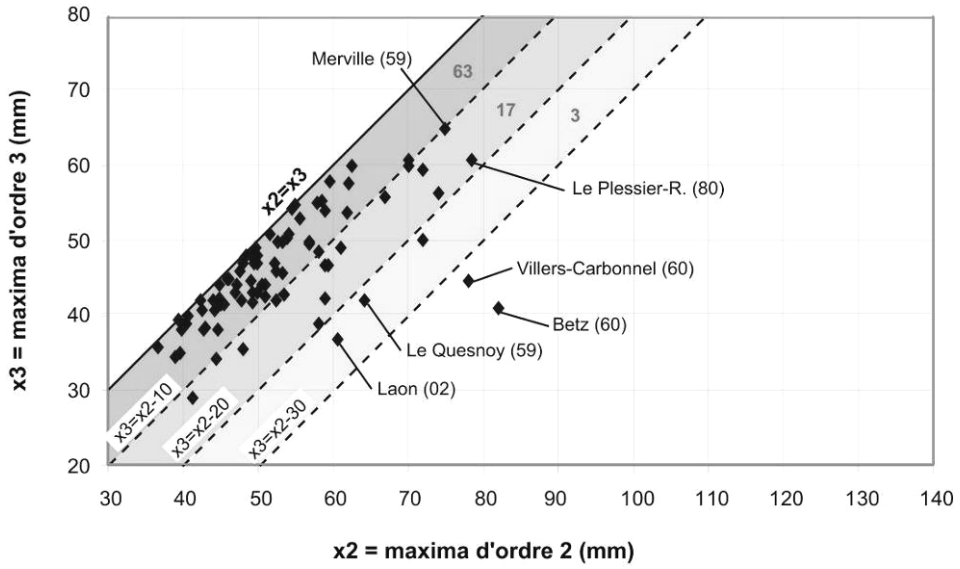
Les maxima mesurés sur quelques stations durant la période 1983-2005 ont été comparés aux valeurs estimées sur la normale climatique (1961-1990). Plusieurs stations ont des maxima qui ont augmenté faiblement (Abbeville, Carpiquet). La station de Deauville a toutefois enregistré une valeur rarissime lors des pluies orageuses du 1er juin 2003 ; le cumul est deux fois plus élevé que celui qui avait été mesuré sur la normale climatique. Sur les neuf stations étudiées, la station de Dieppe est celle qui a le plus grand écart avec la normale, avec un cumul de 100,8 mm relevés en 24h avant 1983.

		1983-2005		1961-1990		
numéro station	NOM	Maximum (x1)	Date	Maximum (x1)	Date	évolution
80001001	ABBEVILLE	65,00	26/08/2002	53,40	juin	+
60639001	BEAUVAIS-TILLE	46,80	24/08/1987	46,80	août	=
14137001	CARPIQUET	44,70 *	04/07/2000	86,20	juillet	+
76351001	LE HAVRE	73,3	05/06/1983	73,30	juin	=
///////////////	DEAUVILLE	124,8	01/06/2003	59,7	juillet	+
76217001	DIEPPE	51,20	25/08/1987	100,8	août	-
59183001	DUNKERQUE	79,10	29/08/1996	55,00	mai	+
59343001	LILLE-LESQUIN	62,80	19/08/2005	49	août	+
76116001	ROUEN-BOSS	81,30	10/08/1983	81,3	août	=

* Le 25 juin 2006 ont été relevés 96,8mm en 24h sur cette même station

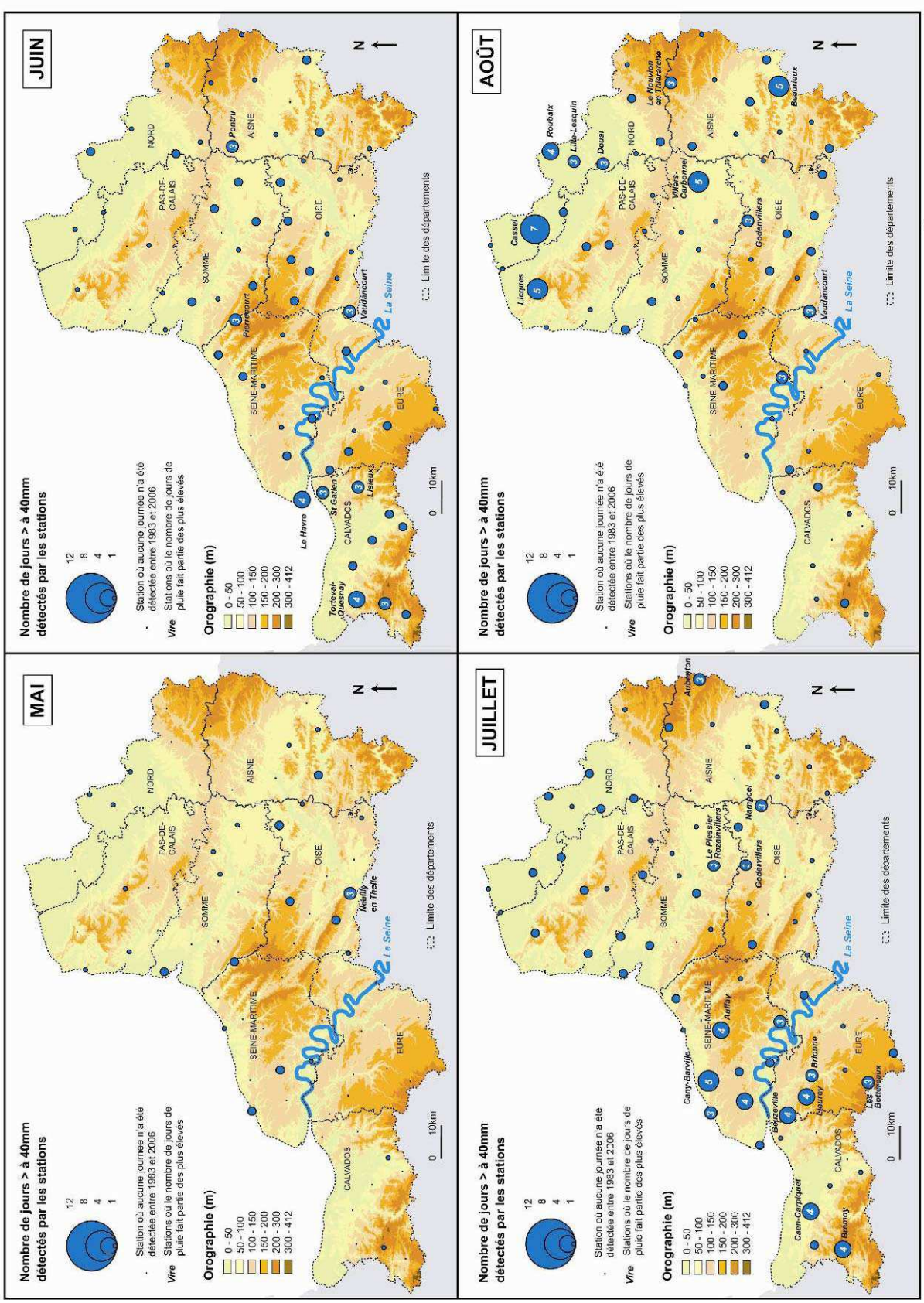
Annexe 4.2. Comparaison entre les maxima de rang 2 et 3.

Les écarts entre les maxima des rangs 2 et 3, plus homogènes, diminuent et ils sont moins importants que les écarts entre les rangs 1 et 2. Les stations les plus pluviogènes présentent des différences élevées, notamment pour les stations de Betz, Villers-Carbonnel ou Le Quesnoy. Cette étude confirme surtout à quel point il faut rester prudent sur les maxima de rang 1. En abaissant le seuil d'intensité, on obtient une meilleure représentativité des valeurs obtenues par le réseau.



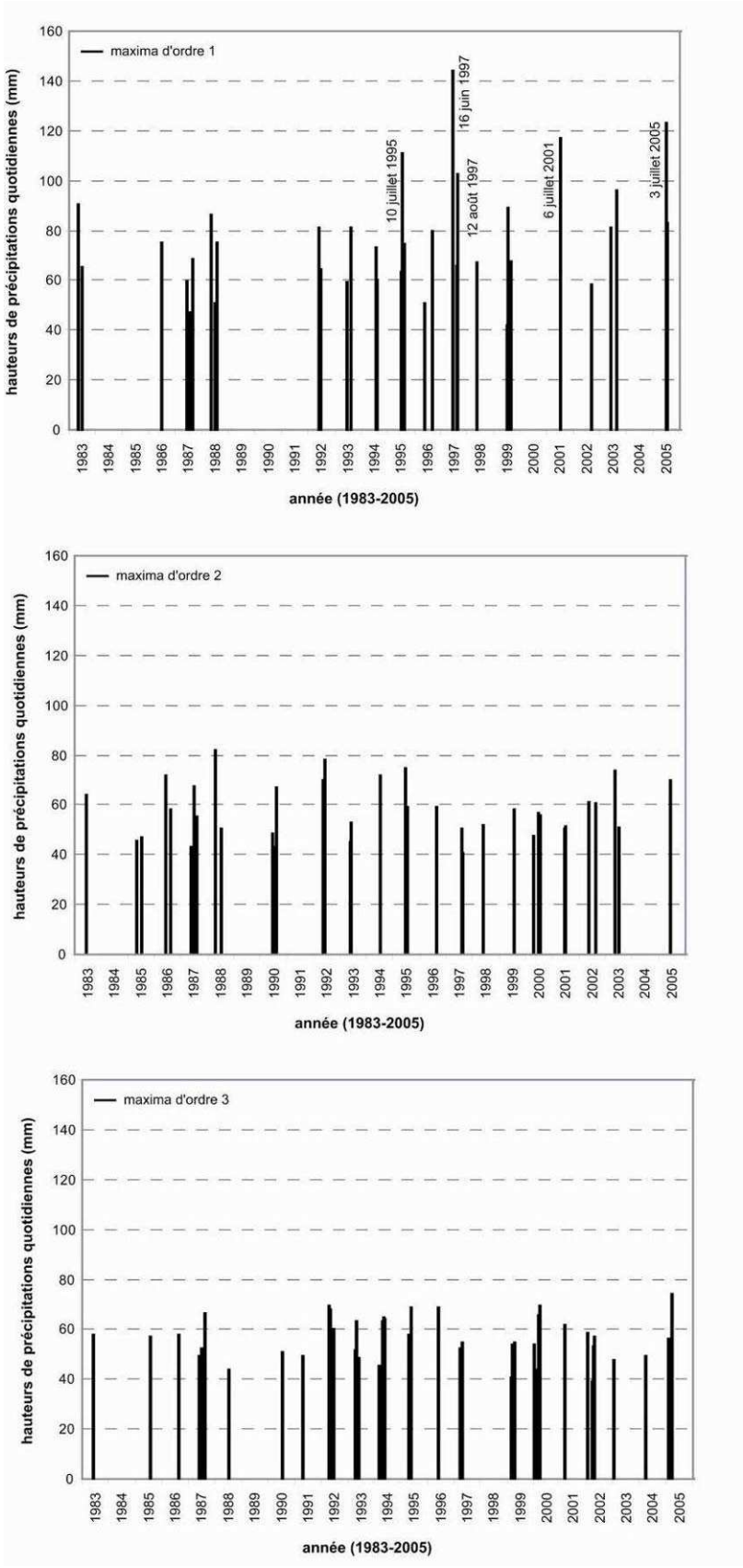
Annexe 4.3. Distribution du nombre de jours où les pluies sont supérieures à 40 mm.

Le gradient spatial est toujours observé, même si le passage au seuil 40 mm fait disparaître un grand nombre de jours où les pluies sont supérieures à cette valeur. La relation est moins systématique au mois de juin car la distribution des stations est homogène dans la partie centrale de la zone d'étude.



Annexe 4.4. Distribution dans le temps des maxima des trois premiers ordres.

La distribution temporelle des maxima des trois premiers rangs a été analysée au cours de la période 1983-2005. Les maxima de rang 1 semblent plus élevés à la fin des années 1990 ; les rangs 2 présentent une plus grande homogénéité dans leur répartition.



Annexe 4.5. Répartition mensuelle des trajectoires des masses d'air.

La trajectoire des masses d'air a aussi été identifiée ; les masses d'air circulant dans un flux de sud-ouest représentent 64 % des circulations et 87 % avec les flux de sud et d'ouest.
Les masses d'air associées à des marais barométriques (MB) circulent principalement dans un flux de sud-ouest (30) et, secondairement, de sud (10). Dans le cas des situations frontales (FC ou FF), les flux viennent du sud-ouest (21) et de l'ouest (5). Les flux d'est, de sud-est et de sud sont tous associés à des marais barométriques.
La répartition mensuelle démontre la prédominance des masses d'air circulant dans un flux de SW (51), le nombre plus élevé des flux de sud au cours du mois de mai (7) et du nord-est en août (4).

trajectoire observée	mai	juin	juillet	août	total
nord (N)	0	0	0	0	0
nord-est (NE)	0	0	0	4	**4**
est (E)	1	0	1	1	3
sud-est (SE)	1	1	0	0	2
sud (S)	**7**	3	0	0	**10**
sud-ouest (SW)	**13**	**18**	**10**	**9**	**49**
ouest (W)	1	0	3	1	5
nord-ouest (NW)	0	0	1	0	1
pas de direction	0	2	1	1	4
total	**23**	**24**	**16**	**16**	**79**

Annexe 4.6. Catalogue des GWL quotidiens.

Ci-dessous sont présentés les différents *Grosswettertyppen* (GWT) et les *Grosswetterlaggen* (GWL) différenciés dans la classification des types de circulations à l'échelle européenne.

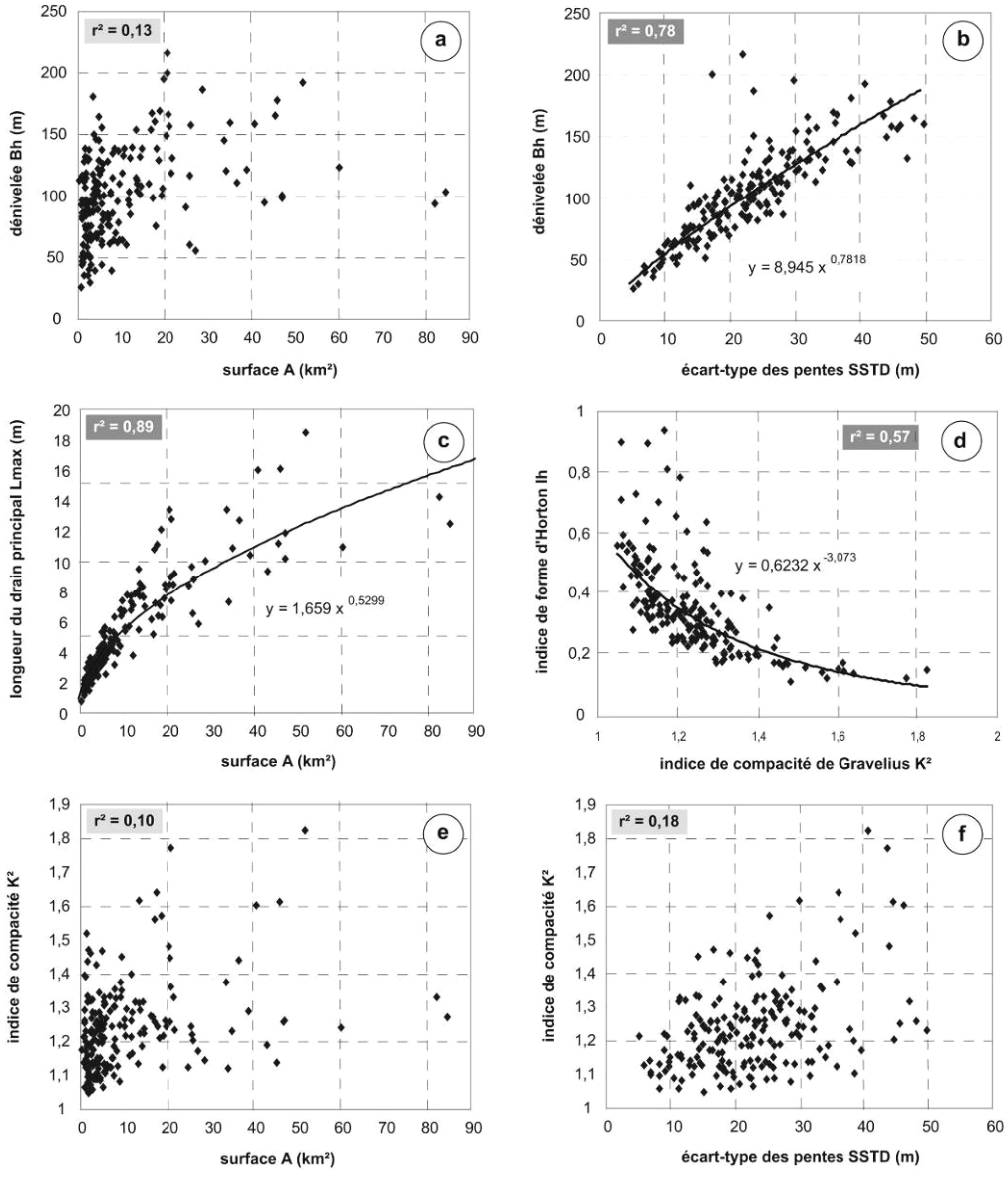
Circulation type			Description	
Major type	Subtype	N	Name	CP
Zonal circulation	W	1	West anticyclonic	Wa
		2	West cyclonic	Wz
		3	Southern West	WS
		4	Angleformed West	WW
Mixed circulation	SW	5	Southwest anticyclonic	SWa
		6	Southwest cyclonic	SWz
	NW	7	Northwest anticyclonic	NWa
		8	Northwest cyclonic	NWz
	HM	9	Central European high	HM
		10	Central European ridge	BM
	TM	11	Central European low	TM
Meridional circulation	N	12	North anticyclonic	Na
		13	North cyclonic	Nz
		14	North, Iceland high, anticyclonic	HNa
		15	North, Iceland high, cyclonic	HNz
		16	British Isles high	HB
		17	Central European trough	TRM
	NE	18	Northeast anticyclonic	NEa
		19	Northeast cyclonic	NEz
	E	20	Fennoscandinavian high anticyclonic	HFa
		21	Fennoscandinavian high cyclonic	HFz
		22	Norwegian Sea – Fennoscandinavian high, anticyclonic	HNFa
		23	Norwegian Sea – Fennoscandinavian high cyclonic	HNFz
		24	Southeast anticyclonic	SEa
		25	Southeast cyclonic	SEz
	S	26	South anticyclonic	Sa
		27	South cyclonic	Sz
		28	British Isles low	TB
		29	Western Europe trough	TRW
Unclassified	U	30	Classification not possible	U

Table 2-2: Circulation Patterns after Hess & Brezowsky (1977)

Annexe 5.1. Valeurs des indices calculés sur les 189 bassins versants touchés (1983-2005)

Huit indices morphométriques ont été calculés sur les 189 bassins étudiés. La taille des bassins et leur dénivelée n'augmentent pas de manière proportionnelle car la relation est assez faible (r^2 = 0,13). En revanche, la relation entre la surface et les écarts-types des pentes (STTD) est plus forte (r^2 = 0,78). La dénivelée varie entre 26 m et 216 m. La répartition des altitudes est relativement homogène (102 m en moyenne et 100 m pour la médiane). 50 % des bassins ont des dénivelées > 100 m et seulement 6 % des bassins ont des différences d'altitude entre les points les plus hauts et les plus bas < 50 m. Ces chiffres confirment que la majorité des bassins est située dans des secteurs où les reliefs sont marqués. Le commandement reste néanmoins très variable sur les bassins < 10 km². La longueur du drain principal varie de 0,7 à 18 km. Cette distance augmente proportionnellement avec la taille du bassin. La relation est élevée, avec r^2 = 0,89. Cet effet d'échelle est plus connu sous le nom de loi de Hack (1957) et elle est confirmée par de nombreux travaux (Gray, 1961 ; Mueller, 1969). En revanche, il n'y a aucune relation entre l'indice de compacité de Gravelius (r^2=0,10) et la surface des bassins ou entre l'indice de Morton et la longueur du drain principal (r^2 = 0,33).

Plusieurs chiffres sont importants à rappeler après cette présentation des données :
- 85 % des bassins ont une taille < 20 km² ; 50 % des bassins ont une taille < à 5,4 km² ;
- 94 % des bassins ont une dénivelée > 50 m, dont 50 % avec des écarts-types de pente > 100 m.



L'ACP a été réalisée sur les valeurs obtenues pour les 189 bassins versants avec le logiciel *XLSTAT*. Les pourcentages de variance expliquée et la contribution de chaque variable (Tab. 5.1.) donnent un bon aperçu de la part de l'information initiale expliquée par les premiers facteurs. Les valeurs ont été centrées-réduites afin de faciliter la comparaison entre les différentes variables.

Le premier axe **F1** explique 49 % d'inertie, ce qui est très important même si, dans notre cas, le nombre de variables initiales est faible (cf. tableau ci-dessous). Toutes les variables contribuent à cet axe F1 à l'exception d'un poids plus faible de la surface et de l'indice d'étalement, ce qui est surprenant. Le fait qu'aucune variable ne se dégage indique rapidement une **dépendance** des variables. Le deuxième axe **F2** explique 29 % de la variance. L'indice de Morton (36%) et la surface (26%) sont les variables les plus explicatives. Cet axe oppose les grandes surfaces à forts étalements (> 20) (en haut) aux surfaces plus compactes et de petite taille (en bas). Les deux composantes (l'axe F1-F2) expliquent 77,8% de l'inertie. Le troisième axe **F3** apporte 13 % d'explication. Les indices de volume (dénivelée et écarts types de pente) contribuent à 73% à l'explication de cet troisième axe. Les trois premières composantes expliquent 91 % de la variabilité observée entre les 189 bassins versants.

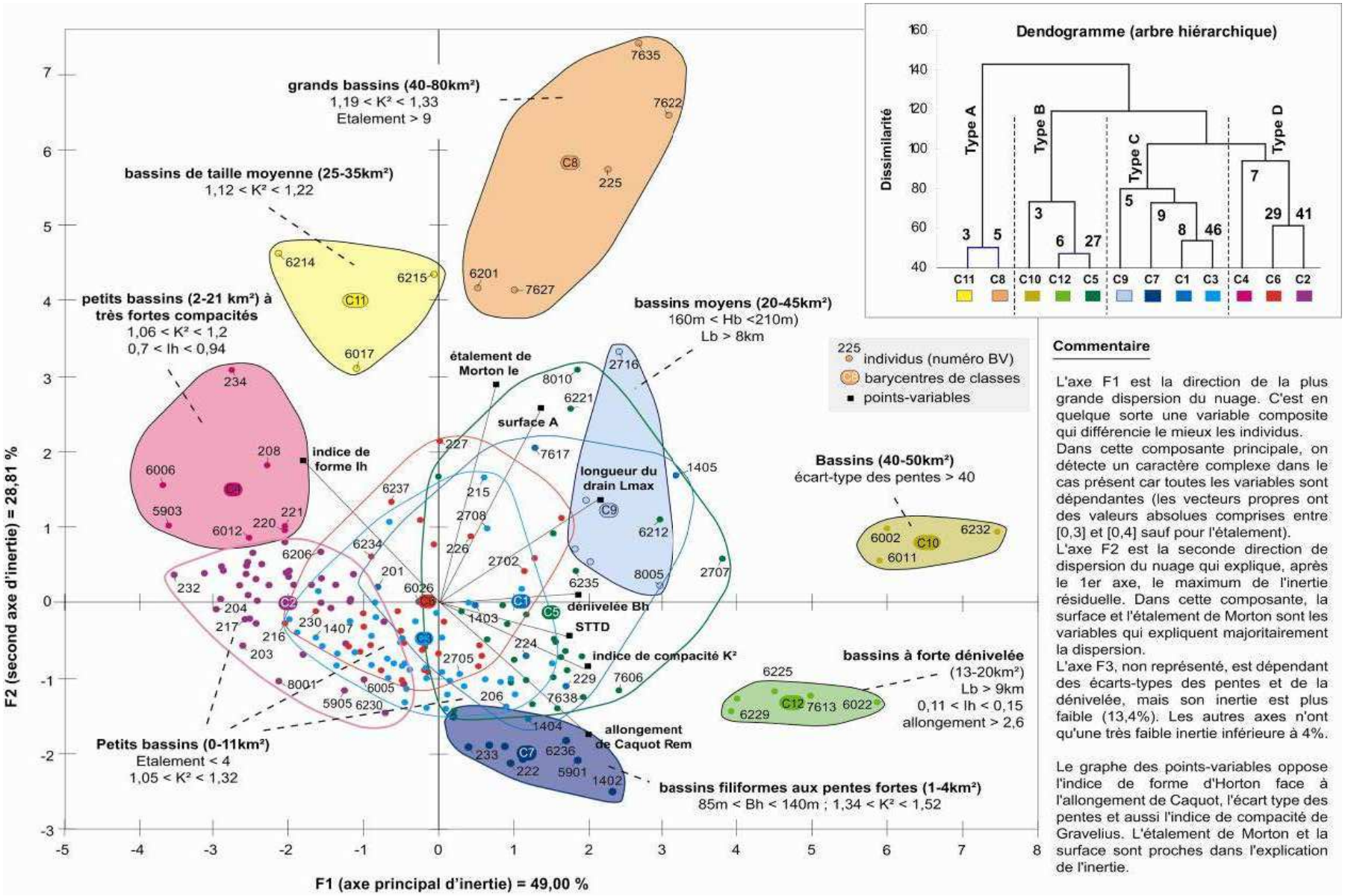
	F1	F2	F3	F4
surface	9,014	**26,307**	2,334	1,326
dénivelée	14,710	0,009	**31,009**	1,813
écart-type des pentes	11,671	0,611	**42,025**	0,649
longueur du drain	18,294	7,077	3,240	0,971
indice de forme Horton	11,841	14,353	7,607	**30,102**
indice de compacité Gravelius	17,086	2,320	5,753	**64,146**
allongement Caquot	15,241	12,833	6,920	0,817
étalement Morton	2,142	**36,490**	1,112	0,177
Variabilité (%)	48,998	28,807	13,408	4,016
Variabilité cumulée (%)	48,998	77,805	91,213	95,229

Une CAH a été appliquée sur le tableau des coordonnées prises par les individus (bassins versants) sur les huit axes factoriels. Il s'agit de regrouper les individus selon leur degré de ressemblance pour former des groupes les plus homogènes possibles. La CAH utilise la distance euclidienne comme mesure de dissemblance et le minimum de Ward qui permet de fusionner deux classes ayant une faible inertie (Chadule, 1994 ; Pumain, 1997). Différentes partitions ont été testées selon un nombre de classes plus ou moins important. La meilleure partition est celle qui maximise l'inertie inter-classes tout en minimisant l'inertie intra-classes. Dans le cas présent, une partition en 12 classes était la plus significative. Une représentation graphique sur F1-F2 montre les catégories retenues.

Le dendogramme (ou arbre hiérarchique) détaille le processus de regroupement des 189 bassins. Le dessin de l'arbre hiérarchique fournit une aide précieuse pour la description des classes et sa représentation cartographique(figure suivante).

L'interprétation des classes obtenues par CAH se base sur les moyennes et écarts types de chaque variable de façon à mesurer la variabilité intra-classe et entre les individus au sein d'une même classe (Annexe 5.1.). Les **barycentres de classes** définissent un *« profil moyen »,* représentatif des individus présents dans chacun des groupes. L'analyse est complétée par la projection des individus sur l'axe F1-F2 (fig. 5.14.). **Les caractéristiques des classes les plus originales** ont été ajoutées sur le graphique pour en faciliter la lecture. Il convient de ne pas oublier que deux groupes identiquement placés sur cet axe factoriel F1-F2 peuvent présenter des différences importantes sur les autres plans factoriels.

La CAH affine les oppositions mises à jour par les axes factoriels de l'ACP. Les bassins peuvent être distingués en quatre grandes catégories.



Commentaire

L'axe F1 est la direction de la plus grande dispersion du nuage. C'est en quelque sorte une variable composite qui différencie le mieux les individus.
Dans cette composante principale, on détecte un caractère complexe dans le cas présent car toutes les variables sont dépendantes (les vecteurs propres ont des valeurs absolues comprises entre [0,3] et [0,4] sauf pour l'étalement).
L'axe F2 est la seconde direction de dispersion du nuage qui explique, après le 1er axe, le maximum de l'inertie résiduelle. Dans cette composante, la surface et l'étalement de Morton sont les variables qui expliquent majoritairement la dispersion.
L'axe F3, non représenté, est dépendant des écarts-types des pentes et de la dénivelée, mais son inertie est plus faible (13,4%). Les autres axes n'ont qu'une très faible inertie inférieure à 4%.

Le graphe des points-variables oppose l'indice de forme d'Horton face à l'allongement de Caquot, l'écart type des pentes et aussi l'indice de compacité de Gravelius. L'étalement de Morton et la surface sont proches dans l'explication de l'inertie.

Type A : Bassins de moyenne à grande taille (> 25 km²) présentant un fort étalement (8 bassins). Les bassins du type 2 de la première typologie (fig. 5.9.) sont quasiment tous dans ce type A (8 sur 11). L'indice de compacité est inférieur à 1,3. Des bassins de taille moyenne (entre 25 et 35 km²) [classe 11] s'opposent aux plus grands bassins (> 40 km²) dont la longueur du cours d'eau principal dépasse 9 km [classe 8].

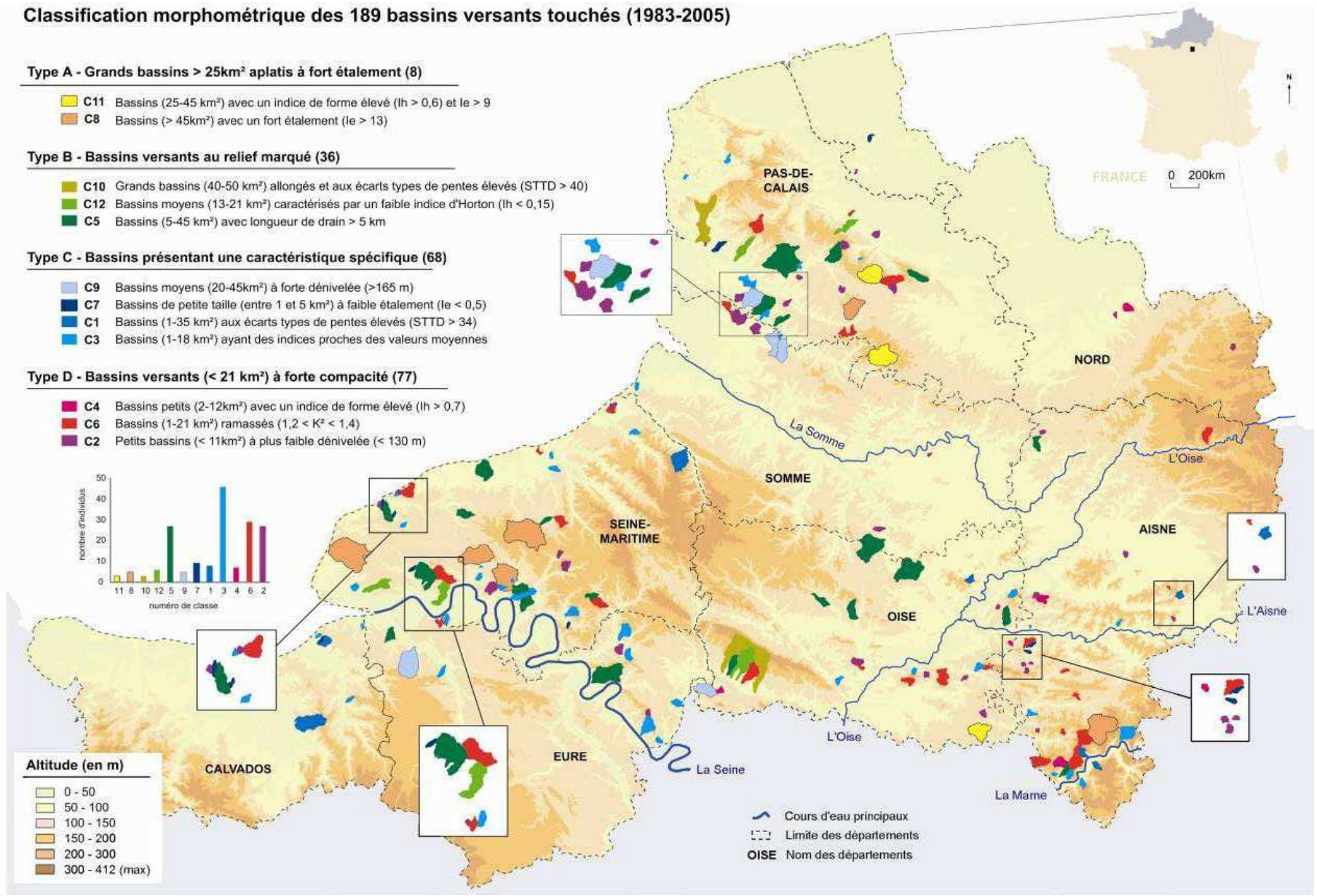
Type B : Bassins (5-45 km²) en forte pente et situés sur des reliefs marqués (36 bassins). On distingue **:** les grands bassins (45-50km²) peu compacts, aux écarts types de pente élevés [type 10] qui se situent tous sur des revers de cuesta (les 3 manquants du type 2) ; les bassins de taille moyenne (13-20km²) caractérisés par un très faible indice de forme d'Horton et qui sont très allongés (allongement supérieur à 2,6) [type 12] ; les bassins présentant un faible indice d'Horton et une compacité (1,12–1,45) relativement faible. Ce dernier sous-type est proche du type C ; il s'en distingue par une plus forte variance intra-classe des valeurs de surfaces et par des longueurs de drain principal plus élevées.

Type C : Bassins présentant une caractéristique spécifique (68 bassins). On distingue : des entités de moyenne taille (20-45km²) avec une forte dénivelée, > 160 m [classe 9] ; des bassins filiformes de très petite taille (de 1 à 5 km²) et aux pentes fortes [classe 7] ; des individus intermédiaires (5-45km²) qui ont un indice d'Horton plus faible (< 0,4) une dénivelée moins marquée [classe 1], ou un cours d'eau plus allongé [classe 3]. La classe 3 est la plus délicate à interpréter car elles regroupent des bassins aux valeurs moyennes.

Type D : Bassins de petite taille (< 21 km²), à forte compacité, qui présentent une forte empreinte morphologique (77 bassins). Trois types sont dissociés : les bassins de petite taille (entre 2 et 12 km²) qui ont à la fois une compacité (K^2 < 1,2) et un indice de forme élevés (Ih > 0,7) [classe 4] ; les bassins (< 11 km²) à faible dénivelée mais présentant des écarts-types de pentes assez élevés ([classe 2] ; les bassins (< 21 km²) avec une dénivelée moyenne de 100 m et une compacité moins marquée (K^2 ~ 1,3) [classe 6].

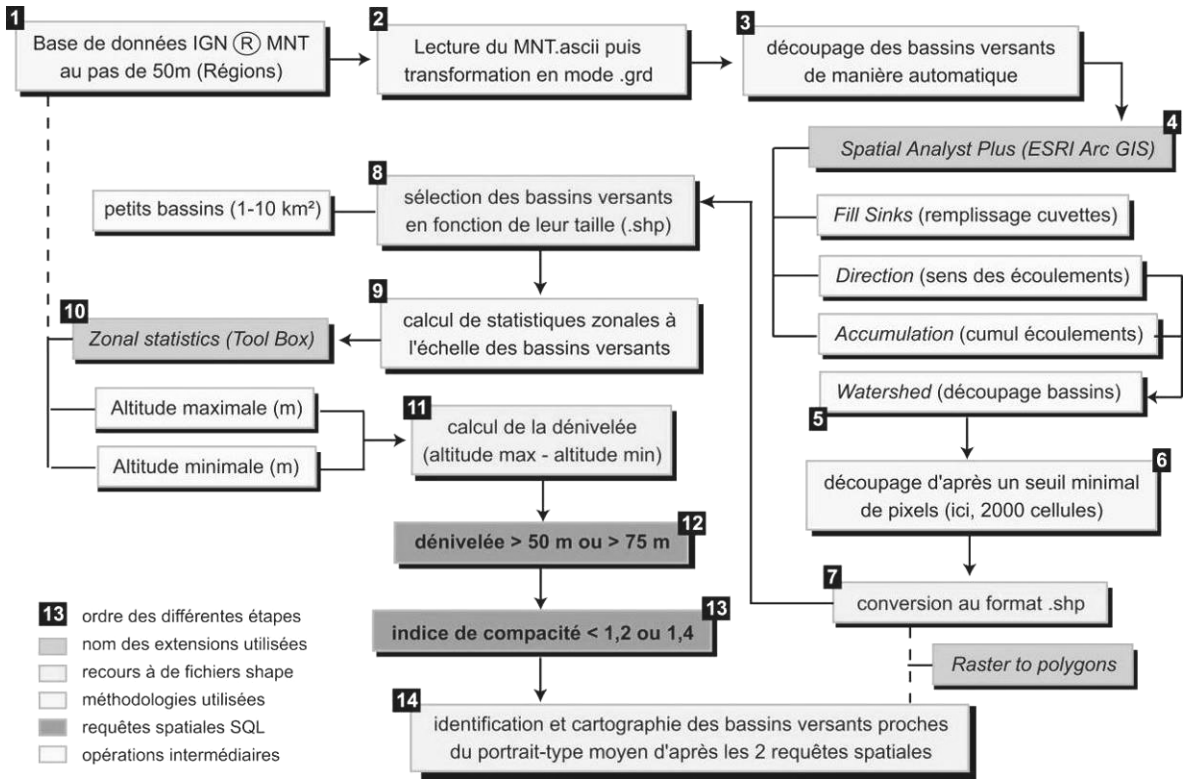
Cette première analyse donne des résultats intéressants. Le type A se distingue par des critères de forme (taille et étalement) et il correspond au type 2 de la première typologie. Il s'oppose aux trois autres types qui se démarquent par des critères morphologiques plus marqués. Ces bassins se distinguent en fonction de leur **système de pente** (Type B), leur **compacité** (Type D) ou pour **certaines particularités** (allongés, filiformes) (Type C).

Les indices morphométriques sont toutefois trop dépendants les unes des autres, ce qui rend l'analyse délicate. C'est pour cette raison que ces résultats n'ont pas été intégrés dans le texte. xte.


Classification morphométrique des 189 bassins versants touchés (1983-2005)
Type A - Grands bassins > 25km² aplatis à fort étalement (8)
C11 Bassins (25-45 km²) avec un indice de forme élevé (Ih > 0,6) et Ie > 9
C8 Bassins (> 45km²) avec un fort étalement (Ie > 13)
Type B - Bassins versants au relief marqué (36)
C10 Grands bassins (40-50 km²) allongés et aux écarts types de pentes élevés (STTD > 40)
C12 Bassins moyens (13-21 km²) caractérisés par un faible indice d'Horton (Ih < 0,15)
C5 Bassins (5-45 km²) avec longueur de drain > 5 km
Type C - Bassins présentant une caractéristique spécifique (68)
C9 Bassins moyens (20-45km²) à forte dénivelée (>165 m)
C7 Bassins de petite taille (entre 1 et 5 km²) à faible étalement (Ie < 0,5)
C1 Bassins (1-35 km²) aux écarts types de pentes élevés (STTD > 34)
C3 Bassins (1-18 km²) ayant des indices proches des valeurs moyennes
Type D - Bassins versants (< 21 km²) à forte compacité (77)
C4 Bassins petits (2-12km²) avec un indice de forme élevé (Ih > 0,7)
C6 Bassins (1-21 km²) ramassés (1,2 < K² < 1,4)
C2 Petits bassins (< 11km²) à plus faible dénivelée (< 130 m)
nombre d'individus
0 10 20 30 40 50
11 8 10 12 5 9 7 1 3 4 6 2
numéro de classe
FRANCE
0 200km
N
PAS-DE-CALAIS
NORD
SOMME
SEINE-MARITIME
AISNE
OISE
EURE
CALVADOS
La Somme
L'Oise
L'Aisne
La Seine
La Marne
Altitude (en m)
0 - 50
50 - 100
100 - 150
150 - 200
200 - 300
300 - 412 (max)
Cours d'eau principaux
Limite des départements
OISE Nom des départements

Annexe 5.3. Principes du découpage automatique des bassins versants.

La procédure de découpage automatique des bassins versants est rappelée ci-dessous (Arc Gis). Les deux requêtes spatiales ont ensuite été appliquées afin de sélectionner un certain type de bassins, qui répondent aux caractéristiques morphologiques précédemment mises en avant.



Annexe 6.1. Bases de données spatialisées sur le nord de la France et coût de leur acquisition.

L'essor des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) a permis la création de bases de données d'occupation du sol spatialisées qui servent de relais entre la télédétection, les observations de terrain et les données statistiques. Bon nombre de bases de données spatialisées existent désormais à des échelles nationale, régionale et locale. Sur les régions du nord de la France, cinq bases de données sont recensées sur des territoires à échelle variable (fig. 6.1.). La définition des classes d'occupation du sol est basée sur l'état du couvert végétal à un instant t et sur différentes nomenclatures (Corgne, 2004 ; Houet, 2006), ce qui empêche toute comparaison entre ces bases de données.

	Nom de la base de données	Source (émetteur)	Dates / Versions	Echelle d'utilisation	Spécificités techniques	Coût (€ / km)
couvertures exhaustives	Corine Land Cover	IFEN	1990, 2000	1/100 000 ème	Images satellitales / espace européen / nomenclature hiérarchique en 3 niveaux	gratuit
	BD Carto	IGN	1986, 2003	du 1/25 000 ème au 1/100 000 ème	Images satellitales / espace français / nomenclature en 11 sous postes	variable (3200€ Gard)
	SPOT Théma	SPOT Image	1990 - 2003	1/10 000 ème	Images satellitales / France métropolitaine / nomenclature hiérarchique adaptée	(47 € /km²)
couvertures localisées	Occupation du sol Nord-Pas-de-Calais	SIGALE Nord-Pas-de-Calais	1991 1998, 2005	1/50 000 ème 1/15 000 ème	Images satellitales SPOT 20m (6 postes) / photos aériennes / nomenclature CORINE	(10 € /km²) (6,5€ mise à jour)
	Occupation des sols Vallée de la Sambre	Agence d'urbanisme Sambre	2002, 2006	1/10 000 ème	Photos aériennes 2004, enquêtes terrain, cadastre numérique / particularités du bâti	(77 € /km²)

L'utilisation d'une ACP-CAH a déjà été testée sur les indices morphométriques. Les résultats obtenus à partir des données du Recensement Général Agricole paraissent néanmoins plus pertinents pour les objectifs fixés dans le chapitre 6. On rappelle ici le principe de construction d'une telle méthode.

La démarche méthodologique retenue repose sur l'utilisation de techniques d'analyse multivariées associées à la cartographie, et notamment sur le binôme *Analyse en Composantes Principales* (ACP) et *Classification Ascendante Hiérarchique* (CAH). Ces traitements sont de plus en plus fréquemment utilisés pour créer des indices synthétiques à partir de données obtenues sous des SIG, Système d'Information Géographique (Liébault *et al*., 2001 ; Shary *et al*., 2002 ; Grohmann, 2004 ; Germaine *et al*., 2007).

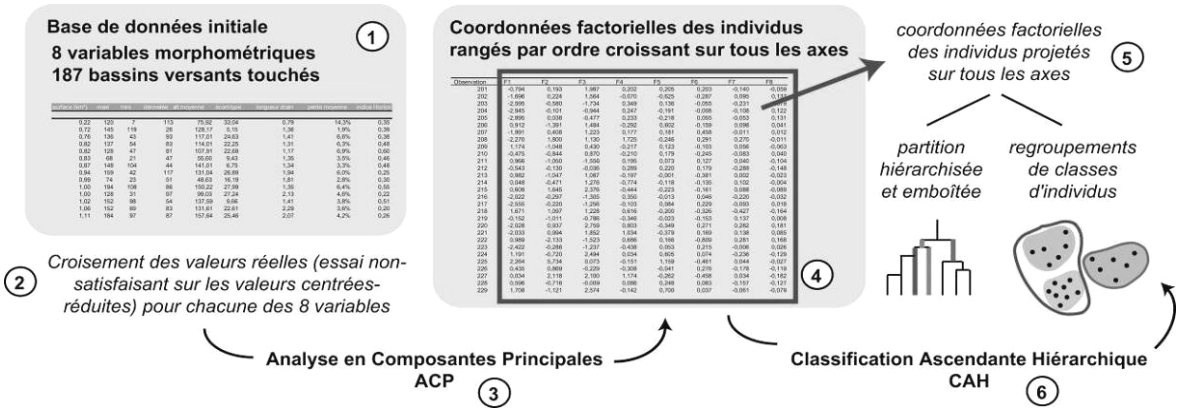
L'ACP est adaptée pour traiter et représenter l'information quantitative multivariée (Bermond, 2004). Initialement, la matrice de données s'apparente à un tableau d'information géographique (fig. 5.9.) comportant en ligne le numéro des bassins versants et en colonne les huit variables morphométriques décrivant ces unités géographiques. En passant par l'ACP, il s'agit de simplifier le tableau de départ de façon à remplacer toutes les variables par une ou deux variables, que l'on appelle des *composantes principales*, tout en conservant l'essentiel de l'information originelle (Beguin et Pumain, 1994).

Parmi ces indices synthétiques, l'ACP cherche celui qui permet de voir la plus forte inertie entre les individus, c'est-à-dire celui pour lequel la variabilité entre les individus est maximale (Pumain, 1997 ; Bermond, 2004). Une proportion de la variabilité totale est alors expliquée par cette composante. Une deuxième composante est ensuite recherchée tout en respectant deux conditions : avoir une corrélation nulle avec la première composante, et avoir, à son tour, la plus grande variabilité (Philippeau, 1992).

Le but d'une ACP est de représenter le maximum d'informations contenues entre les paramètres sous une forme graphique. « *L'ACP cherche à déterminer un sous espace factoriel qui sera utilisé pour projeter un nuage de points qui offrira le maximum d'inertie expliquée* » rappelle Bermond (2004).

L'ACP fournit de nouvelles variables non corrélées entre elles. Les coordonnées projetées dans un plan multidimensionnel servent dans un second temps à alimenter la **CAH** dont le but est de regrouper les entités ayant des caractéristiques communes (Béguin et Pumain, 1994).

Les coordonnées des individus statistiques (ici, les bassins versants) dans les premiers plans factoriels de l'ACP offrent l'avantage de grouper au sein de classes communes les individus qui se ressemblent le plus entre eux selon une logique de partition hiérarchisée et emboîtée (Bermond, 2004). La typologie est affinée en jouant sur le nombre de classes ou en attribuant le poids des variables conformément aux résultats issus de l'ACP (fig. 5.11.).



Document réalisé par J.Douvinet, modifié d'après Bermond (2004)

Annexe 6.3. Méthode et données utilisées pour la carte de l'aléa érosion des sols.

Une synthèse du principe de construction des cartes d'aléa érosion des sols est proposée ci-dessous. **Elle résume les articles de Y. Le Bissonnais *et al*. (1998, 2002) et les rapports de l'IFEN (2004, 2005).**

L'érosion est envisagée du point de vue des surfaces émettrices de particules solides (venant de l'érosion de versant), et non pas du point de vue du transport de ces particules dans les cours d'eau et de leur dépôt à l'aval. Dans cette optique, il y a érosion à partir du moment où le déplacement de particules dépasse la centaine de mètres ou sort d'une parcelle agricole, sans préjuger de leur devenir. D'autres processus (érosion de berges, régimes hydrologiques contrastés, etc.) influent sur la charge solide transportée par les fleuves. Ces processus seraient donc à prendre en compte en complément de l'aléa érosion de surface, pour caractériser l'érosion de grands bassins ou évaluer les apports de sédiments dans des retenues ou des estuaires.

Une autre spécificité de cette approche réside dans la **différenciation saisonnière** de l'aléa qui permet de rendre compte de la réalité des différents régimes climatiques. Cette approche saisonnière offre, en outre, la possibilité de prendre en compte les interactions entre facteurs climatiques et occupation des sols de manière beaucoup plus précise que dans une approche annuelle et donc de mieux prendre en compte les différents types d'aléas érosifs.

Le modèle est de type **système expert**, utilisant une méthode de croisement de paramètres sous forme de combinaisons logiques. Les paramètres sont hiérarchisés et pondérés à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnement érosif. A chaque combinaison est affectée une classe de sensibilité à l'érosion des sols. Ce modèle est **qualitatif** et il est représentable sous la forme d'une arborescence logique. Chaque couche d'information est d'abord maillée au pas de 50 m, pixel défini par la plus petite unité spatiale informée (maille du modèle numérique de terrain).

La cartographie de l'intensité de l'aléa érosion est réalisée en plusieurs étapes. Après avoir créé une base de données (couvertures thématiques) en sélectionnant les paramètres de l'érosion correspondant aux données d'entrée du modèle, la cartographie est élaborée en trois temps :

Etape 1: évaluation de la sensibilité potentielle des terrains à l'érosion, établie à partir du croisement de données sur les sols, l'occupation des sols et la pente à la résolution des mailles élémentaires ;

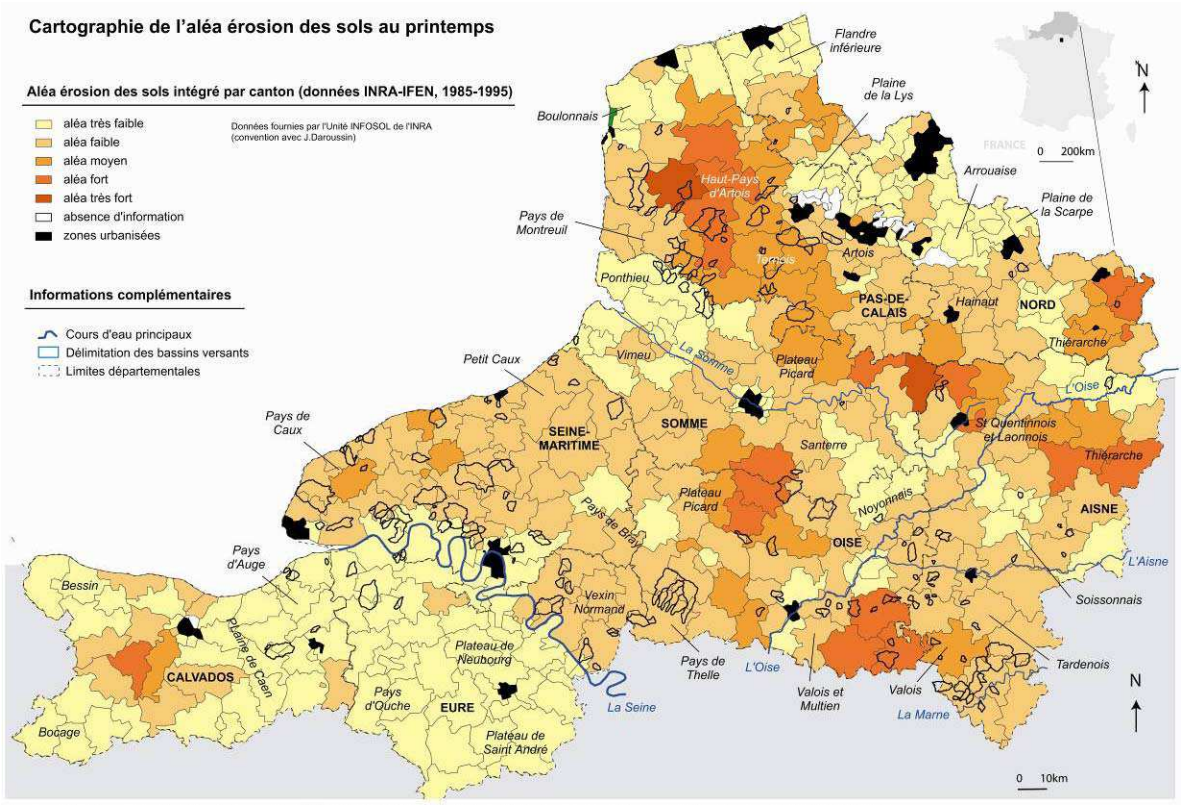
Etape 2: évaluation de l'aléa moyen d'érosion saisonnier obtenu par croisement de la sensibilité potentielle avec les précipitations moyennes saisonnières pour chaque maille élémentaire ;

Etape 3: intégration de l'aléa par unité spatiale (bassin versant hydrographique, cantons, communes, bassins versants).

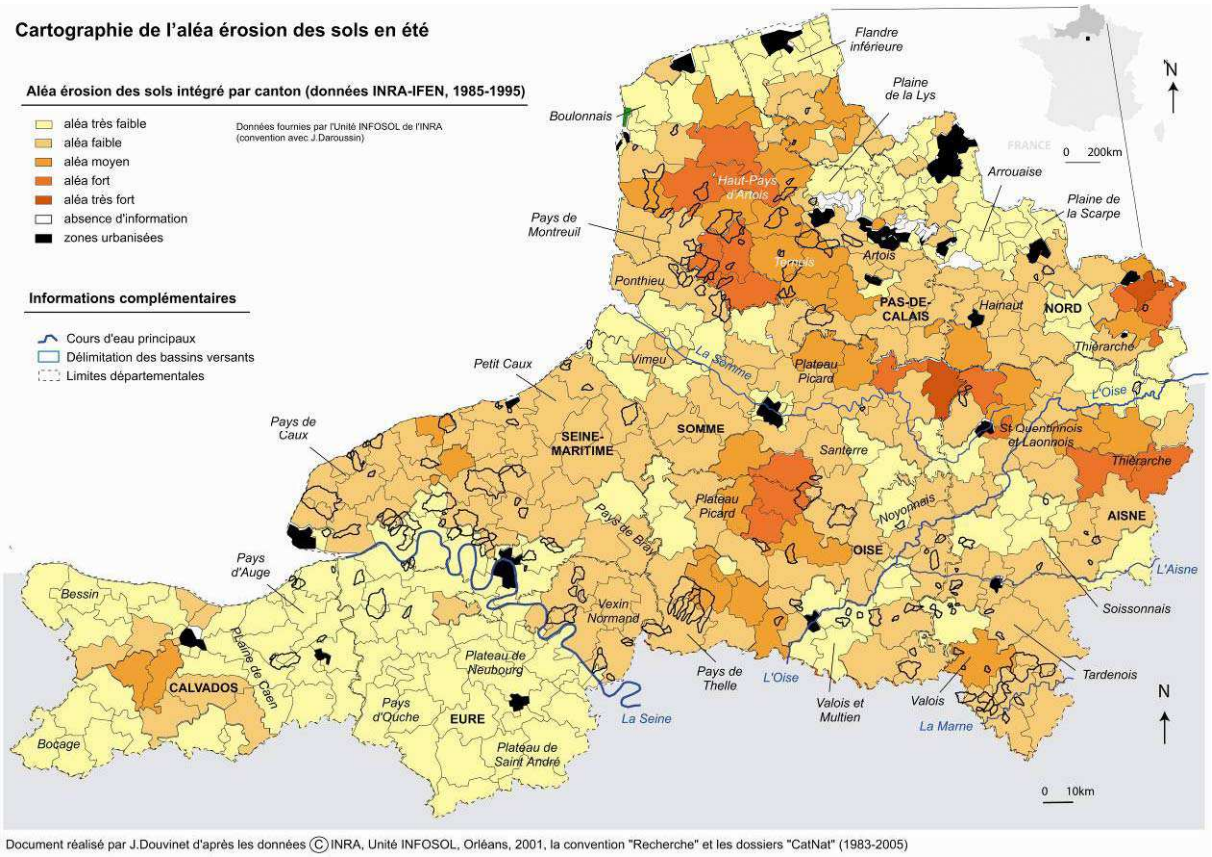
« Ce modèle, qui reste assez général, ne permet cependant pas de qualifier un risque, qui ne peut être évalué qu'à partir d'informations de portée locale, sur la vulnérabilité des populations et les installations vis-à-vis de l'érosion » (IFEN, 2005). La carte de l'aléa ne suffit pas, à elle seule, à expliquer la répartition des coulées boueuses recensées. Les pratiques agricoles, l'aménagement de l'espace rural, la pression démographique, le mode d'urbanisation (diffus ou concentré), qui modifient le paysage et accroissent la vulnérabilité, entrent également en jeu (IFEN, 2005).

Annexe 6.4. Cartes saisonnières de l'aléa érosion des sols (printemps/été).

Ci-dessous sont présentées les cartes de sensibilité à l'aléa érosion (d'après les données INRA Infosol).



Document réalisé par J.Douvinet d'après les données © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2001, la convention "Recherche" et les dossiers "CatNat" (1983-2005)



Document réalisé par J.Douvinet d'après les données © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2001, la convention "Recherche" et les dossiers "CatNat" (1983-2005)

Annexe 6.5. Fiabilité des données *Corine Land Cover* sur le bassin d'Aizelles (02).

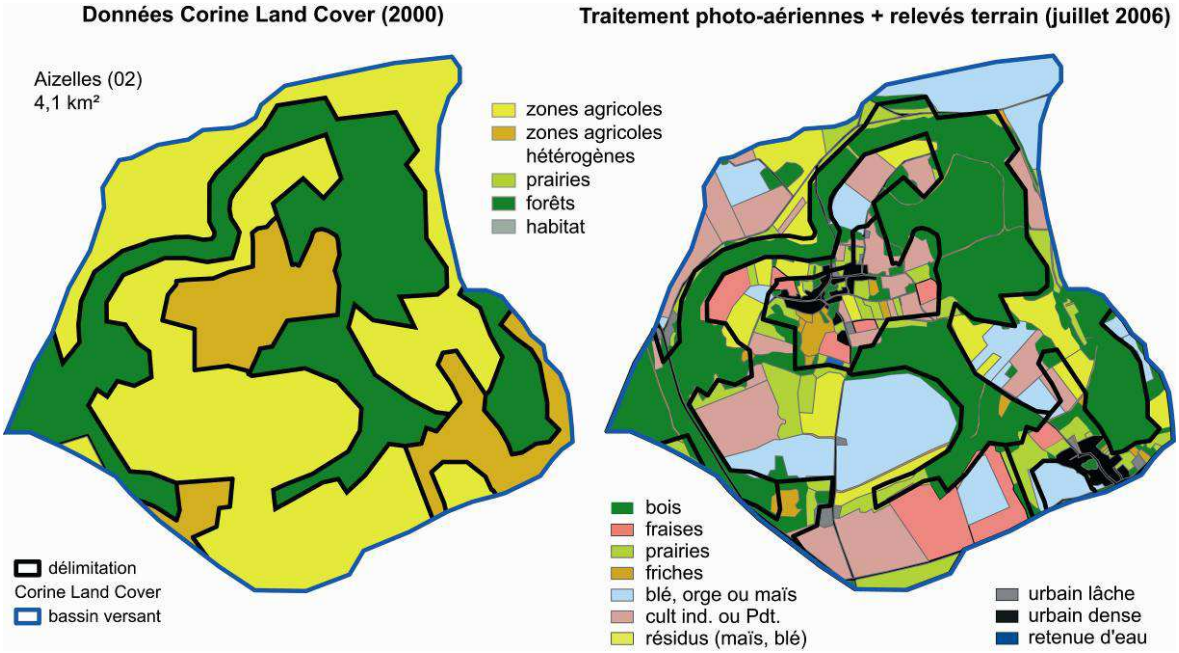
Les données *Corine Land Cover* présentent plusieurs limites, notamment parce que les cartographies ne sont utilisables qu'à une échelle large (échelle régionale) et qu'elles rendent compte de l'occupation du sol à un instant donné. Afin de vérifier la pertinence de cette base de données, un des bassins touchés par une « *crue rapide* » (1983-2005) – le bassin d'Aizelles (4,1km²) – a été plus finement étudié.

Si, à l'échelle locale, des différences importantes sont observées, les écarts sont minimes à une échelle globale, surtout pour les surfaces boisées et bâties. Il faut toutefois se méfier de la catégorie généraliste « *zones agricoles hétérogènes* », qui ici, regroupe des espaces urbanisées, des zones cultivées, des jardins. Les prairies temporaires sont également incluses dans la catégorie « *zones agricoles* », ce qui peut poser des problèmes sur la part réellement occupée par les surfaces réinfiltrantes.

b **Bassin d'Aizelles (4,1 km²) - Aisne**

	A	B	écarts A / B		C	écarts B / C	
Classes	Corine	Orthophotoplans	Valeurs	en %	Terrain	Valeurs	en %
cultures	50	49,1	+ 0,9	+ 2%	45,3	+ 3,8	+ 8%
prairies	2	8,6	**- 6,6**	- 330%	11,5	**- 2,9**	- 34%
bois	33	36,5	- 3,5	+ 11%	30,9	+ 5,6	+ 15%
bâti	15	5,8	**+ 9,2**	+ 61%	12,3	**- 6,5**	- 112%
total	100	100	0	0	100	0	0

Nota : Les "surfaces agricoles hétérogènes" (Corine) ont été redistribuées entre prairies ou zones urbanisées.

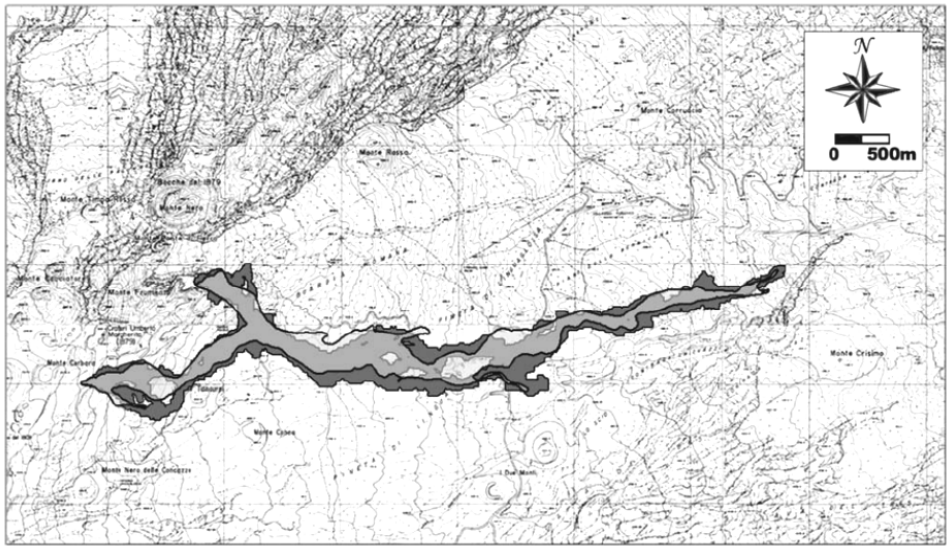


On propose ici de faire un point sur les **applications récentes** en géographie physique et environnementale. Les automates suivants seront sommairement détaillés car l'idée, ici, est de voir leur degré de malléabilité et de transformation, et non d'expliquer leur fonctionnement. Si les applications sont nombreuses et récentes, elles traitent de problématiques géographiques diverses, avec des automates qui se distinguent par la nature des objets d'étude. On peut ainsi distinguer :

- *la mécanique des fluides :* La simulation de collisions entre des particules, dans un espace temps discret, a permis de définir les équations de Navier-Stockes (Frisch *et al.*, 1990). Des simulations ont aussi été tentées pour la modélisation des écoulements fluides à partir de particules d'eau (Drogoul, 1995), mais l'objet géographique est trop petit et les algorithmes utilisés pas assez simplifiés.

- *les écoulements de lave* : Dans le modèle **SCIARA γ2**, les laves sont des blocs caractérisés par une masse qui change en fonction de la vitesse de déplacement et qui produit un écoulement quand sa position se déplace vers un bloc voisin (Di Gregorio *et al.*, 1996 ; Avolio *et al.*, 2006). Plusieurs tests ont permis de faire avancer les versions des automates depuis 1986, en passant d'un AC-3D trop compliqué à un AC-2D plus simple, opérationnel, avant de progressivement repasser à un AC-3D (Crisci *et al.*, 2003 ; Avolio *et al.*, 2005). Les simulations sont ainsi comparées à des cas concrets (fig. 8.3).

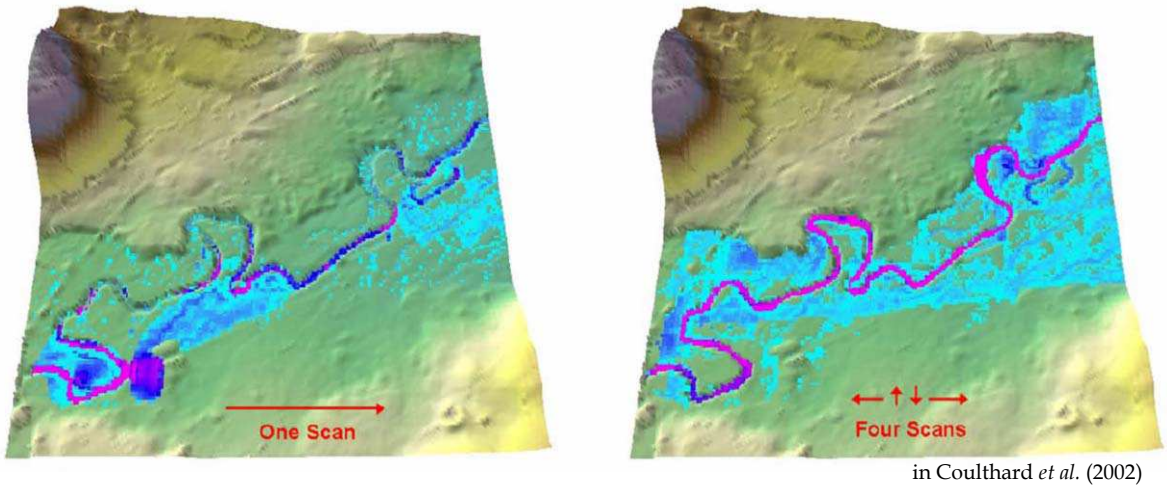
Ci-dessous les simulations (en noir) sont comparées à la coulée de lave de l'Etna (en gris) de novembre 2002, après 3 jours et 16h avec l'automate cellulaire SCIARA γ2 (Avolio *et al.*, 2006).



in Avolio *et al.* (2006)

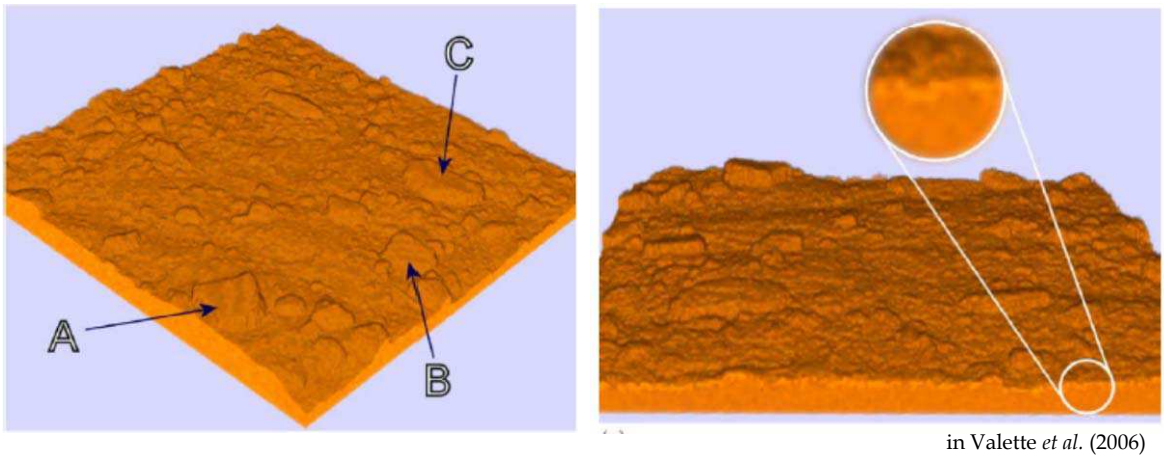
- *les processus hydrologiques et sédimentaires.* Murray et Paola (1994) initient les recherches sur des écoulements en section canalisée en attribuant dans les règles de transition une fonction capable de mesurer la profondeur de l'écoulement et une autre pour modifier la topographie interne au sein de la section canalisée tout en tenant compte du bilan sédimentaire (ablation, transport, sédimentation). La structure de l'automate dissocie les écoulements divergents et convergents, et la profondeur de l'eau est matérialisée par une ou plusieurs cellules. Ces travaux ont été améliorés par Thomas et Nicholas (2002) ou Nicholas et Quinne (2007) avec d'autres apports empiriques. L'automate **CAESAR** (*Cellular Automaton Evolutionary Slope And River*) peut simuler les érosions de berges, l'influence du méandrage, les hauteurs d'eau atteintes pour certaines inondations (fig. 8.4.), le remplissage sédimentaire de vallées depuis l'Holocène (Coulthard *et al.*, 2000, 2005 ; 2006, 2007 ; Van de Wiel *et al.*, 2007).

Ci-dessous est simulée une crue de $100 m^3.s^{-1}$ sur une section de 2 km de long sur la rivière Teifi (Pays de Galles) avec une (a) ou plusieurs (b) directions d'écoulement (d'après Coulthard *et al.*, 2007).



in Coulthard *et al.* (2002)

- *les mouvements de terrain ou les dégradations liées à des processus d'érosion.* En utilisant des règles morphologiques simples, Chase (1992) arrive à reconstituer des paysages façonnés depuis plusieurs milliers d'années. Favis-Mortlock (1998) simule l'initiation de cours d'eau et l'évolution des incisions à l'échelle des versants en partant d'un réseau de drainage et de règles de transition dérivées des connaissances apportées par les modèles d'érosion WEPP et EUROSEM. L'automate **SoDA** a, lui, été développé pour simuler la dégradation de l'état de surface d'un sol à la suite d'une pluie unitaire (ci-dessous) et à l'échelle métrique (Valette *et al.*, 2006). Le croisement avec des règles issues des travaux portant sur les écoulements liquides et solides a permis de simuler des processus à très petite échelle.



in Valette *et al.* (2006)

D'autres thématiques auraient pu être évoquées : l'impact des aménagements sur les forêts (Ménard *et al.*, 2005), les incendies et leur diffusion (Sarkar et Abbasi, 2006), les changements d'occupation des sols (Coulthard *et al.*, 2000 ; Shoshany et Kelman, 2006), les courants turbides (Salles *et al.*, 2006), la formation des dunes côtières, l'évolution des littoraux (Projet **CEMCOS**, *High Resolution Cellular Model for Costal simulation*, Dearing *et al.*, 2005).

Le foisonnement des automates, avec des structures et des objets diversifiés, montre les contributions croissantes de cet automate au service de la géographie environnementale.

On propose de rappeler ici, dans les grandes lignes, les principes de fonctionnement qui conditionnent la **vitesse d'écoulement utilisée pour la simulation des effets de pente** (Langlois et Delahaye, 2002 ; Delahaye, 2002 ; Langlois, 2005, 2007 ; Gaillard *et al*., 2008).

Lors du processus itératif, le temps est discret et il correspond en fait aux itérations n du système. Ce système est modifié par l'adjonction d'un algorithme temporel. Dans les simulations temporelles, le temps est dissocié des itérations, mais en dépend par une incrémentation de pas dt à chaque itération, le temps s'exprime alors par : t = n.dt + t0. Dans ce cas, le temps est exprimé en seconde et la valeur du pas dt vaut une minute par défaut. Dans les simulations temporelles, le temps sert à modéliser les vitesses d'écoulement surfacique ou linéaire qui sont fonction de différentes variables (pente, rugosité, hauteur d'eau, etc.).

Lorsque quelques millimètres d'eau ruissellent dans une prairie ou une culture, nous sommes loin d'un fonctionnement laminaire idéal. Les modèles mathématiques classiques (comme les équations de St Venant) ne sont plus vraiment applicables. Un choix pragmatique a été fait : celui de la simplicité et de la souplesse. La remarque la plus simple part de l'action de la pesanteur d'une masse sur un plan incliné. L'accélération Γ qui s'applique à cet objet ne dépend pas de sa masse et suit la loi :

$$\Gamma = kg \sin \alpha$$

où g est la force de pesanteur, k une constante et a l'angle du plan incliné. Ce qui signifie qu'en l'absence de frottement, la vitesse augmente proportionnellement au temps et au sinus de l'angle de pente. On peut penser ici que la rugosité importante du terrain stabilise rapidement la vitesse, mais qu'à terrain égal, cette vitesse de stabilisation reste proportionnelle au facteur sin a dû à la pente. En ce qui concerne l'influence de la hauteur d'eau, les équations dérivées de Saint-Venant, sembleraient donner une vitesse proportionnelle à la racine carrée de la hauteur. En effet, le modèle physique d'écoulement à régime constant exprime le couple (h,v) en fonction du débit Q et la pente θ

$$v = \sqrt[3]{\frac{8gQ\theta}{f}}$$

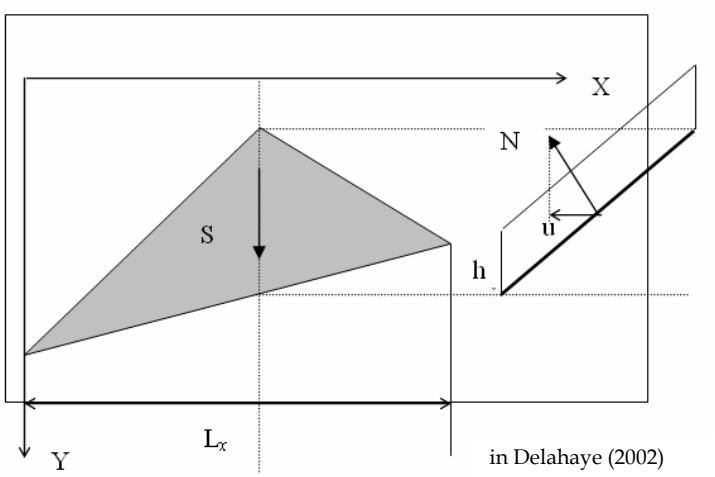
$$h = \sqrt[3]{\frac{fQ^2}{8g\theta}}$$

où v est la vitesse d'écoulement du flux (m/s), f un coefficient de frottement, h la hauteur de la lame d'eau (m), θ, l'angle de pente (radians) et g = 9,81 la force de gravité (m/s²).

On peut en déduire la variation de v en fonction de h, avec K=8g/f supposé constant. :

$$v = \sqrt{\frac{8gh\theta}{f}} = \sqrt{Kh\theta}$$

Cependant, cette formule, qui donne la vitesse en fonction de la hauteur, est trompeuse car elle vient d'un modèle qui calcule simultanément la hauteur et la vitesse à partir du débit d'une lame d'eau sur un plan incliné (cf. figure ci-dessous). Dans ce modèle la hauteur n'est donc pas la cause de la vitesse, mais co-varie avec elle en fonction du débit. Or, nous ne connaissons pas le débit Q (c'est justement ce qu'on veut modéliser). De plus, la hauteur d'eau est très petite (quelques millimètres ou centimètres) devant l'étendue de la surface, la pente est faible (quelques degrés) et surtout la rugosité du terrain très grande devant la quantité d'eau. un modèle linéaire par morceaux facilement paramétrable a donc été préféré. Ainsi, on utilise une fonction v de deux variables, h et u, où h est la hauteur d'eau et u = sin a que l'on appelle *« pente »* par abus de langage a), où chaque variable est paramétrable (en tout 6 paramètres). La fonction v est définie comme une combinaison de fonctions linéaires par morceaux pour chacune des variables. Ce choix n'est pas définitif, on peut facilement changer de fonction.



in Delahaye (2002)

Deux hypothèses simples guident ce travail: la rugosité du sol amène l'eau à couler à vitesse constante pour une pente et une hauteur d'eau fixes, et cette vitesse varie proportionnellement à l'inclinaison (u) et à la hauteur d'eau (h) dans l'élément (Langlois et Delahaye, 2002). On considère aussi que la vitesse de sortie de l'eau est la même qu'à l'intérieur de l'élément.

Ainsi, les débits d'entrée et de sortie n'étant pas forcément égaux, il peut se produire une variation de hauteur d'eau au cours du temps dt, produisant en t+dt une modification de la vitesse de sortie. On se donne une pente maximum de validité du modèle, par exemple 45°, qui donne une valeur :

$$u_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{2},$$

on définit ensuite une vitesse maximale v0 d'écoulement en pente nulle et une vitesse v1 d'écoulement en pente maximale pour la hauteur k11.

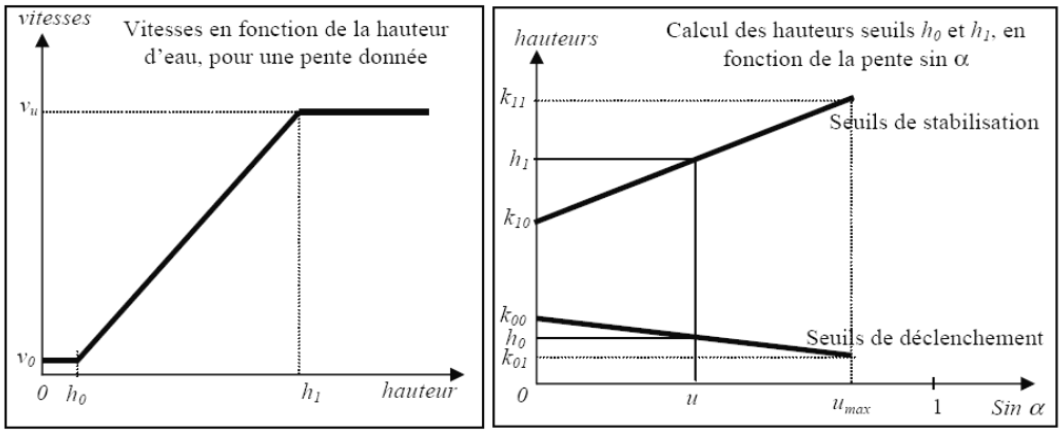
On introduit **6 constantes** qui représentent respectivement :
- hauteur d'eau à partir de laquelle se déclenche un écoulement constant en pente nulle (k_{00});
- hauteur d'eau à partir de laquelle se déclenche un écoulement constant en pente maxi (k_{01});
- hauteur d'eau au delà de laquelle la vitesse d'écoulement se stabilise à v_0 en pente nulle (k_{10});
- hauteur d'eau au delà de laquelle la vitesse d'écoulement se stabilise à v_1 en pente maxi (k_{11});
- vitesse maximale d'écoulement en pente nulle et hauteur h_0 (v_0);
- vitesse maximale d'écoulement en pente maxi et hauteur h_1 (v_1);

hauteur d'eau minimale à partir de laquelle se déclenche un écoulement en pente nulle	k00=	1
hauteur d'eau minimale à partir de laquelle se déclenche un écoulement en pente maxi	k01=	0,1
hauteur d'eau de stabilisation de la vitesse d'écoulement en pente nulle	k10=	50
hauteur d'eau de stabilisation de la vitesse d'écoulement en pente maximale	k11=	100
vitesse minimale d'écoulement	v_0 =	0,2
vitesse maximale d'écoulement	v_1=	60

A partir de ces six constantes, il est possible de calculer les différents seuils en fonction de la pente et la distribution des vitesses associées (figure 3). A l'heure actuelle, et sans modifier les paramètres, le calage du modèle utilise neuf paramètres en associant trois paramètres de rugosité.

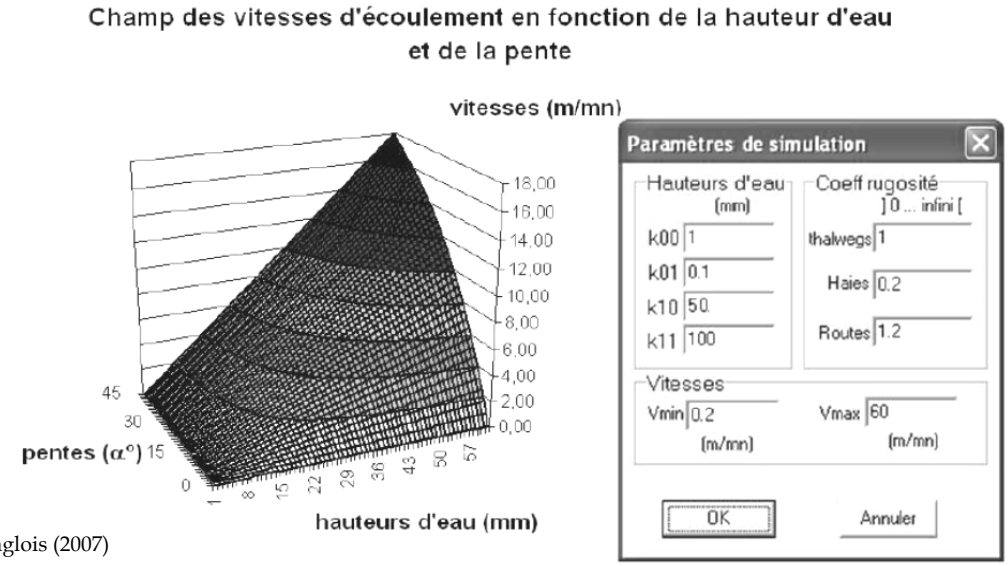
Les trois figures suivantes synthétisent finalement les différentes règles de fonctionnement.

- calcul des différents seuils en fonction de la pente et vitesses associées :



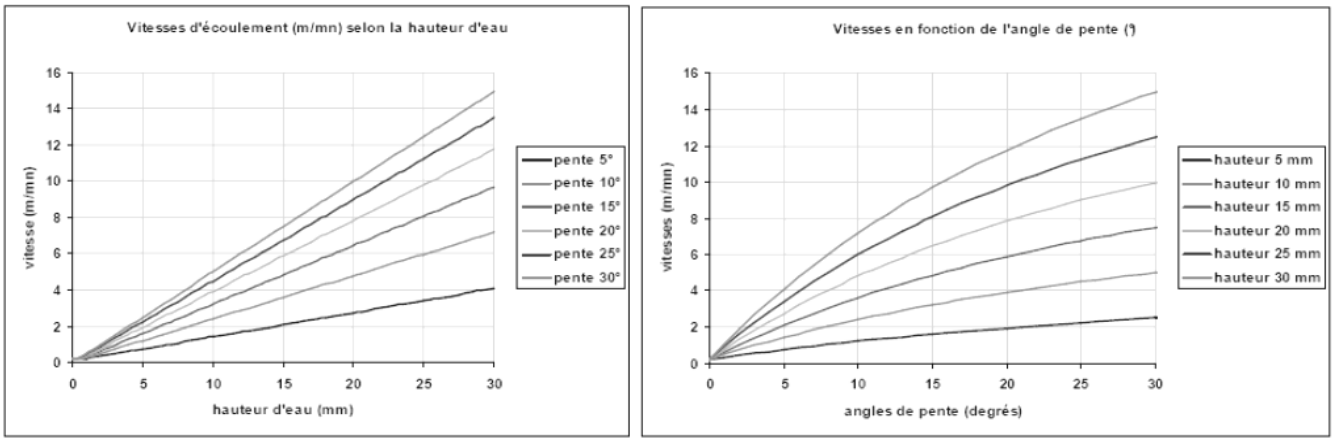
in Langlois (2007)

- champ de vitesses en fonction de la hauteur de la lame d'eau et de la pente :



in Langlois (2007)

- traduction graphique de l'incidence de la hauteur et de la pente sur la vitesse d'écoulement :

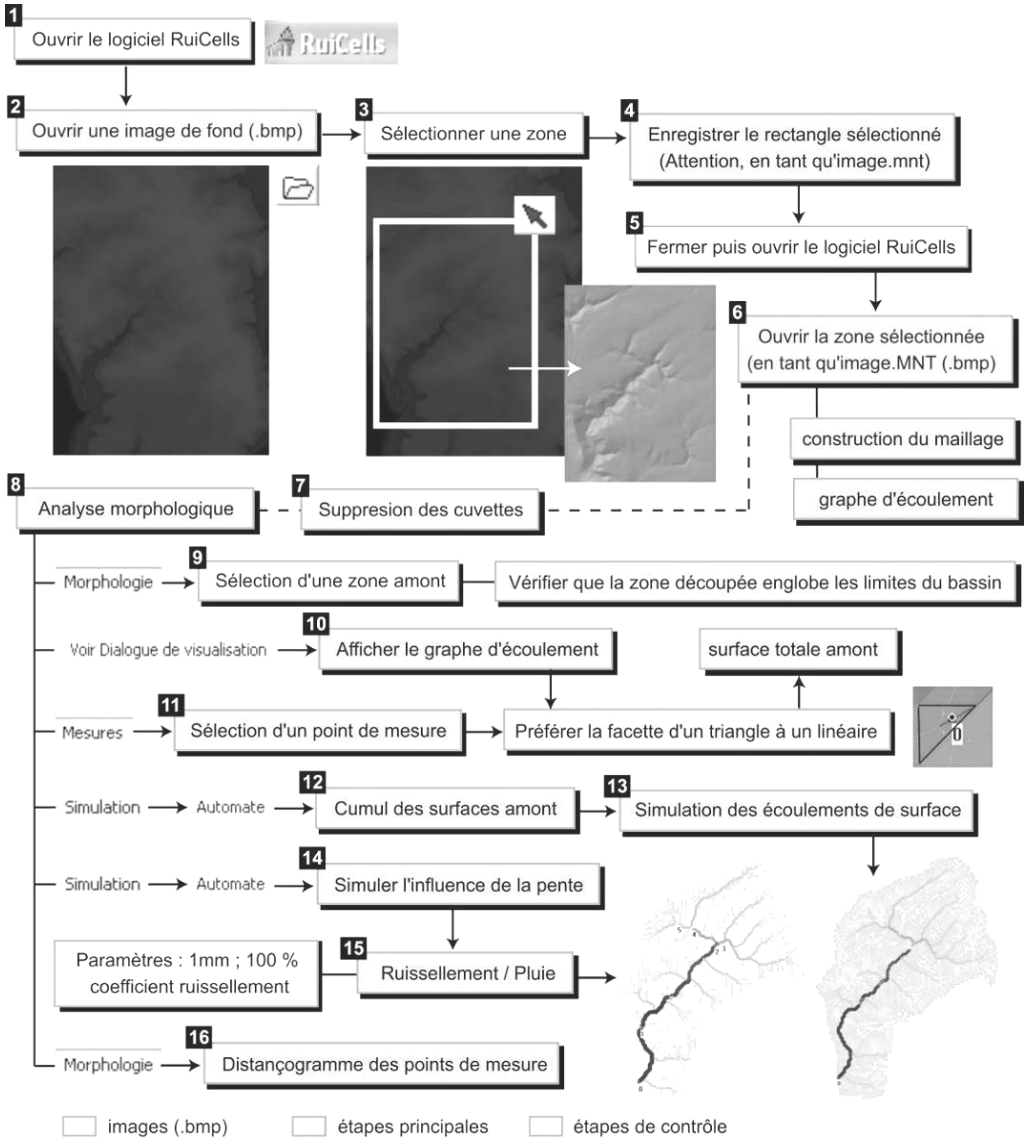


in Langlois (2007)

Plusieurs étapes sont nécessaires pour passer du Modèle Numérique de Terrain aux simulations. Si des paramètres sont mal calés ou mal utilisés, des messages d'erreur en informent l'utilisateur.

L'ordre de chacune des opérations doit être scrupuleusement respecté. Les premières étapes (figure ci-dessous) décrivent la procédure à appliquer pour passer d'une image MNT au format (.bmp) à la construction du maillage et au graphe d'écoulement. Les erreurs liées à la discrétisation de ce MNT doivent être supprimées afin d'éviter tout problème pour les simulations futures. Un point de mesure est ensuite choisi par l'utilisateur. Il est conseillé de privilégier un point sur une facette triangulaire plutôt que sur un linéaire, plus difficile à sélectionner. Les différentes simulations peuvent être lancées (fig. 8.17.) une fois les données d'entrée paramétrées dans le Menu *Simulation – Automate*.

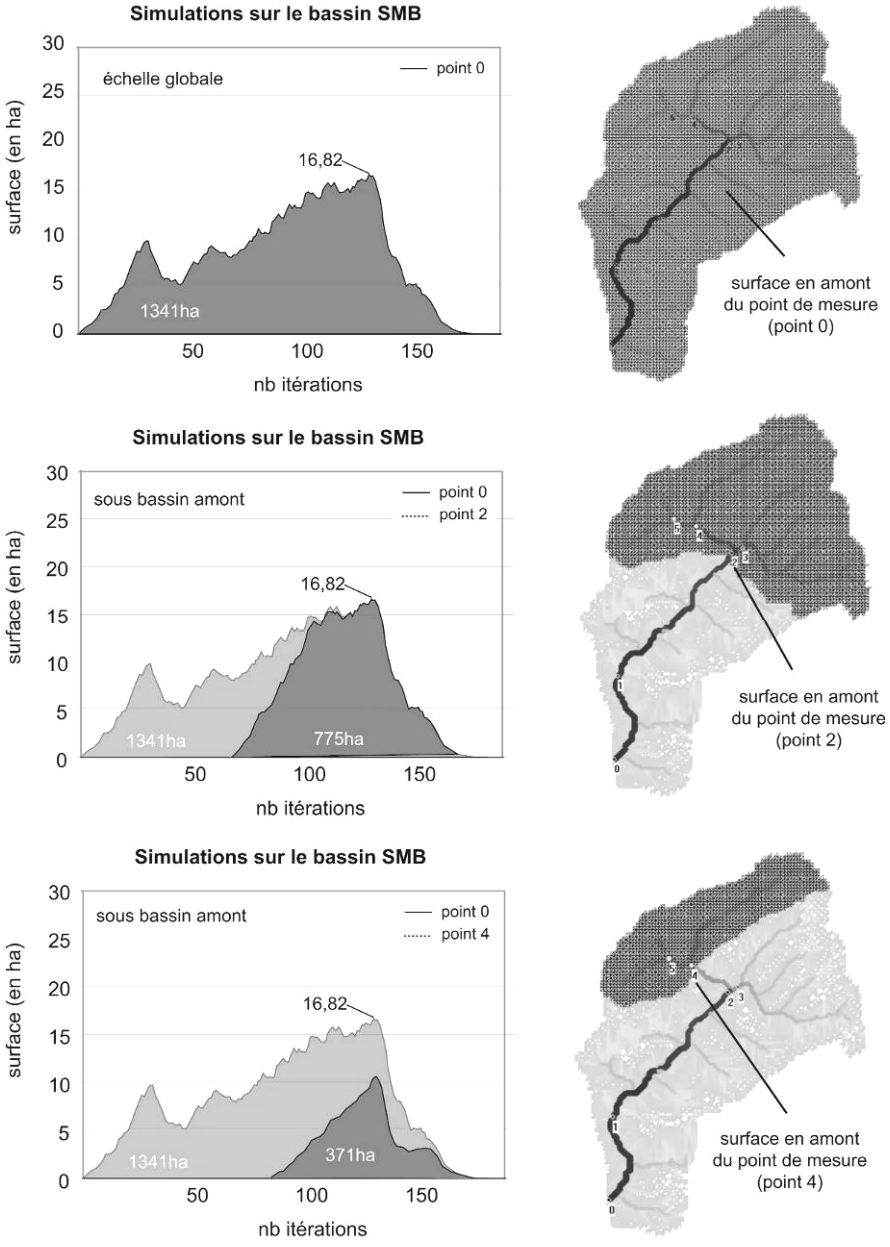
Un « *dialogue de visualisation* » peut être affiché sur la gauche de l'écran (à afficher à partir du Menu, *Voir*). Les **principales options** y sont disponibles : pentes et sommets des triangles, courbes de niveau, graphe d'écoulement, affichage des cartes thématiques en couleur, image de fond, zones sélectionnées, légende des couleurs. Pour voir les cartes des simulations, il faut cliquer sur *Thème en couleur* une fois la simulation lancée et terminée. Un module est en cours de développement pour extraire ces cartes et les exporter sous ESRI ® Arc Gis de façon à les confronter à d'autres bases de données spatiales.



Annexe 9.1. Contributions des sous bassins par rapport au surfaçogramme mesuré à l'exutoire.

Afin de mieux comprendre la réponse globale mesurée à l'exutoire final du bassin, on peut choisir des sous bassins internes et replacer les différentes contributions par rapport au premier graphique. Une fois les surfaçogrammes récupérés aux points de mesure, il est assez simple de replacer les réponses des sous bassins puisque la fin des simulations donne normalement des valeurs de surface identiques. L'automate permet également de cartographier la surface amont de chaque point de mesure.

L'exemple proposé ci-dessous porte sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville (76).



Annexe 9.2. Noms des 84 bassins versants touchés présentant une efficacité structurelle

Les différents bassins ont été classés ci-dessous en fonction de leur type morphologique (type 1 et 2) et de la nature de leur efficacité structurelle.

Type 1.1 – efficacité interne

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv du vallon Quérelle	type 1.1	efficacité interne	65,55
Bv du Wimy	type 1.1	efficacité interne	64,80
Bv amont du Clignon	type 1.1	efficacité interne	53,42
Bv de Domptin	type 1.1	efficacité interne	56,87
Bv de Monthiers	type 1.1	efficacité interne	54,39
Bv de Charleval	type 1.1	efficacité interne	54,55
Bv du Ravin	type 1.1	efficacité interne	57,36
Bv de la Ravine	type 1.1	efficacité interne	61,61
Bv de Samson	type 1.1	efficacité interne	60,41
Bv de Bizancourt	type 1.1	efficacité interne	58,52
Bv de la rue des Vaux	type 1.1	efficacité interne	61,34
Bv du Fond de Selandre	type 1.1	efficacité interne	53,43
Bv de la Warnette	type 1.1	efficacité interne	62,87
Bv de la Planquette	type 1.1	efficacité interne	58,53
Bv du Bois Brûlé à Sachin	type 1.1	efficacité interne	59,34
Bv Ravin de la Méroise	type 1.1	efficacité interne	55,47
Bv de Caucourt	type 1.1	efficacité interne	60,37
St Martin de Boscherville	type 1.1	efficacité interne	73,38
Vallée du Puits Maillé	type 1.1	efficacité interne	65,28
Val aux Clercs	type 1.1	efficacité interne	64,55
Ruisseau La Ravine	type 1.1	efficacité interne	52,76
Val du Fond des Mares	type 1.1	efficacité interne	67,83
Val d'Hautot sur Mer	type 1.1	efficacité interne	60,87
Valllon de Ry	type 1.1	efficacité interne	58,19
Petit vallon de St Paer	type 1.1	efficacité interne	56,79
Vallon du Fond de Gomare	type 1.1	efficacité interne	54,71
Vallon de Betteville	type 1.1	efficacité interne	50,92
Bassin du Val Horrible	type 1.1	efficacité interne	63,78
BV de Roherville	type 1.1	efficacité interne	54,67
Bv de Fontaine le Bourg	type 1.1	efficacité interne	52,76
Bv de la vallée Bertin	type 1.1	efficacité interne	56,46
Bv du Fossé de Bernâtre	type 1.1	efficacité interne	62,45
Bv du Fond d'Acquet	type 1.1	efficacité interne	56,37

Type 1.1 – homothétie interne

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv d'Hargicourt	type 1.1	homothétie interne	60,19
Bv de la Panilleuse	type 1.1	homothétie interne	55,60
Bv du Fond de Mingoval	type 1.1	homothétie interne	52,55
Bv de la Dordogne	type 1.1	homothétie interne	59,23
Vallon des Quatre Vaux	type 1.1	homothétie interne	56,90
Bassin de Pourville	type 1.1	homothétie interne	61,47

Type 1.1 – hyper-efficace

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv de Jaulgonne	type 1.1	hyper-efficace	63,85
Bassin des Ouis	type 1.1	hyper-efficace	67,56
Bv amont du Corroy	type 1.1	hyper-efficace	62,83
Le Houlme	type 1.1	hyper-efficace	65,58
Vallée de la Fontaine Murée	type 1.1	hyper-efficace	58,65
vallée de la Fontaine St Pierre	type 1.1	hyper-efficace	62,49

Type 1.1 – partie aval uniquement efficace

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv de St Aubin	type 1.1	partie aval efficace	52,00
Bv du ru d'Essômes sur Marne	type 1.1	partie aval efficace	57,97
Bv de Grimaucourt	type 1.1	partie aval efficace	51,47
Bv de la Varnette	type 1.1	partie aval efficace	62,40
Bv d'Auchy les Hesdin	type 1.1	partie aval efficace	62,63
Bv de Maresquel-Ecquemicourt	type 1.1	partie aval efficace	64,30
Bv de la rivière Eps	type 1.1	partie aval efficace	55,54
Les Fontaines	type 1.1	partie aval efficace	52,31
Villers-Ecalles	type 1.1	partie aval efficace	56,72
Vallon de Darnétal	type 1.1	partie aval efficace	63,91
Vallon de la Pissotière à Madame	type 1.1	partie aval efficace	53,03

Type 1.2 – efficacité interne

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv d'Aizelles	type 1.2	efficacité interne	62,70
Bv du Vailly	type 1.2	efficacité interne	53,31
Bv de l'Algot	type 1.2	efficacité interne	64,97
Bv de Villers St Frambourg	type 1.2	efficacité interne	53,64
Bv de Hautefontaine	type 1.2	efficacité interne	53,61
Bv du ru Milleville	type 1.2	efficacité interne	60,56
Bv du Fond de Cailhouet	type 1.2	efficacité interne	55,64
Bv du ru du Moulinet	type 1.2	efficacité interne	53,61
Bv du ru d'Orval	type 1.2	efficacité interne	66,06
Bv du Bout des Rues	type 1.2	efficacité interne	64,25
Bv du Fond de Pottier à Marenla	type 1.2	efficacité interne	54,17

Type 1.2 – homothétie interne

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv de l'Aunette	type 1.2	homothétie interne	59,82
Bv du ru du Moulin	type 1.2	homothétie interne	62,21

Type 1.2 – hyper-efficace

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv d'Haramont	type 1.2	hyper-efficace	71,89

Type 1.2 – partie aval uniquement efficace

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv amont du ru Bartel	type 1.2	partie aval efficace	60,00
Bv de Taillefontaine	type 1.2	partie aval efficace	53,61
Bv de Pontpoint	type 1.2	partie aval efficace	51,80
Bv de Bellefontaine	type 1.2	partie aval efficace	66,96

Type 2 –

Nom du bassin versant	Typologie	Efficacité structurelle	Indice IE max
Bv amont de la Gergonne/Macla	type 2	efficacité interne	63,41
Bv de la Bajuette	type 2	efficacité interne	57,54
Val de Saâne	type 2	efficacité interne	58,44
Bv de la Fontaine	type 2	efficacité interne	57,89
Bv amont de la Quilienne	type 2	efficacité interne	56,84
Val au Cesne	type 2	efficacité interne	63,42
Vallée amont de la Lézarde	type 2	homothétie interne	57,33
Bv de l'Ordrimouille	type 2	hyper-efficace	57,39
Bv amont de la Canche	type 2	partie aval efficace	55,20

Annexe 10.1. Comparaison entre les résultats des simulations obtenues avec *RuiCells* et la méthode rationnelle sur un événement test

La méthode rationnelle (Réméniéras, 1986 ; Llamas, 1993) permet d'estimer un volume et un débit de pointe pour des événements pluvieux de récurrence décennale. Elle fournit des approximations en se basant sur plusieurs paramètres physiques. Le coefficient de ruissellement, évalué à l'échelle globale du bassin, a le rôle le plus important.

La méthode rationnelle suppose que l'intensité de l'averse soit uniforme dans le temps et sur toute la superficie du bassin, et que le débit soit maximal lorsque la totalité du bassin contribue à l'écoulement.

Ci-dessous sont présentés les résultats obtenus sur les deux bassins de Callenville et Estreux avec une pluie-projet de 24,5mm en 1h. Les simulations donnent des volumes ruisselés moins importants sur les deux bassins, avec des écarts proches de 10 %.

Paramètres de base - Estreux

Nom du bassin versant	Estreux
Taille en ha (**A**)	380 ha
Longueur du drain en km (**Lmax**)	2,4 km
Pente moyenne en m/m	0,0177
Coef. de ruissellement moyen en % (**C**)	20 %

Paramètres de base - Callenville

Nom du bassin versant	Callenville
Taille en ha (**A**)	310 ha
Longueur du drain en km (**Lmax**)	2,1 km
Pente moyenne en m/m	0,062
Coef. de ruissellement moyen en % (**C**)	12 %

Nom du bassin	Pluie décennale	Coefficient de ruissellement moyen	**A** - Volumes estimés (méthode rationnelle)	**B -** Volumes estimés (RuiCells)	Ecarts entre les deux ((**B - A**) * 100) / **B**)
Estreux	24mm (1h)	20 %	21 123	19 205	- 10 %
Callenville	24mm (1h)	12 %	7 834	6 969	- 11 %

Liste des figures, tableaux et annexes

Liste des figures

Introduction générale

Fig. 1. Deux modes de fonctionnement distincts en Seine-Maritime (Delahaye et al., 2007). p. 13
Fig. 2. Localisation de la zone d'étude. p. 17

Partie I

Chapitre 1

Fig. 1.1. Localisation des différents sites et dates des catastrophes commentées. p. 24
Fig. 1.2. La crue du 16 juin 1997 sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville : **a)** principaux dégâts, **b)** cinématique des écoulements et estimations du Cemagref ; **c)** occupation du sol. p. 25
Fig. 1.3. Deux coupures de presse issues de *Paris-Normandie* (édition du 17 juin 1997). p. 26
Fig. 1.4. Dommages occasionnés par la crue du 10 mai 2000 sur le vallon St-Paer. p. 28
Fig. 1.5. Localisation des dommages et délimitation des zones inondées (d'après Bernard, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2005 et les données de la DIREN de 2003). p. 29
Fig. 1.6. Reconstitution des écoulements lors des crues du 1er juin 2003. p. 29
Fig. 1.7. Dégâts observés lors de la crue du 28 juin 2005 dans le vallon d'Hautot-sur-Mer. p. 30
Fig. 1.8. Localisation des impacts et reconstitution des écoulements pour la crue du 28 juin 2005 d'après les observations réalisées au lendemain de la crue p. 31
Fig. 1.9. Des crues rapides surgissant aux exutoires de vallons secs urbanisés (modifié d'après Gaillard, 2005). p. 33
Fig. 1.10. Violence des écoulements arrivant aux exutoires urbanisés des bassins versants. p. 34
Fig. 1.11. Incisions dans les sols (**a-b**) et traces de décapage sur les surfaces cultivées. p. 36
Fig. 1.12. Importance des dépôts retrouvés au sein des bassins versants (**a-d**) ; incisions dans le tablier routier (**e-g**) et enrichissement de la charge par mouvements de masse (**h-j**). p. 37
Fig. 1.13. Ampleur des dommages subis aux exutoires urbanisés. p. 38
Fig. 1.14. A) Débits de pointes et **B)** Débits spécifiques versus la taille des bassins versants (d'après Bravard et Petit, 2000 ; Ledoux., 2000 ; Delahaye, 2002 ; Douvinet *et al*., 2007). p. 45
Fig. 1.15. Comparaison des cinématiques des écoulements : **a)** crue de 1988 à Nîmes, dans le Gard (d'après les travaux de Goult, 1993) ; **b)** crue du 1er juin 2003 dans la région de Trouville, dans le Calvados (d'après Bernard, 2005 ; Douvinet *et al*., 2005). p. 46
Fig. 1.16. a) Classification rhéologique et ballon de Meunier (d'après Coussot et Meunier, 1996) ; **b)** Classification hydrométrique ; **c)** zoom sur les trois types de transport. p. 48

Chapitre 2

Fig. 2.1. Création de la base de données à partir de la base « *CatNat* » (Douvinet, 2006a). p. 53
Fig.2.2. Nombre de déclarations triées par département pour l'item « *inondations et coulées de boue* » recensées entre mai et août inclus sur la période 1983 – 2005 (Douvinet, 2006a). p. 54
Fig.2.3. Carte des « *inondations et coulées de boue* » reconnues entre mai et août inclus et recensées entre 1983 et 2005 (Douvinet, 2006a). p. 55
Fig.2.4. Cumuls et durées des pluies à l'origine des « *crues rapides* » associées à des épisodes orageux (1983 – 2005) et seuils utilisés pour la reconnaissance de l'état « *catastrophe naturelle* ». p. 57
Fig.2.5. Dommages liés à des épisodes de grêle (photos issues des dossiers « *CatNat* »). p. 58
Fig.2.6. Apports des rapports techniques et création des la seconde base de données. p. 61
Fig.2.7. Les étapes nécessaires pour un inventaire détaillé et précis des « *crues rapides* ». p. 63
Fig.2.8. Quelques photos des dégâts et estimations des niveaux probables atteints lors de la crue rapide du 7 juin 2007 sur le bassin versant d'Estreux (Douvinet *et al*., 2008). p. 64
Fig.2.9. Nombre d'épisodes, de communes et de bassins touchés par des « *crues rapides* » p. 66
Fig.2.10. Localisation des bassins versants touchés par une « *crue rapide* » liée à de fortes pluies en périodes printanière ou estivale et problèmes de ruissellement localisés. p. 67
Fig.2.11. Nomenclature choisie : numéro du département puis code du bassin versant. p. 69
Fig.2.12. Numéros attribués pour chaque bassin versant recensé (1983-2005) + 2007. p. 70

Chapitre 3

Fig. 3.1. Evolution du nombre de bassins versants touchés par épisode. p. 76
Fig. 3.2. Nombre de bassins versants touchés cumulés par année et par département. p. 76
Fig. 3.3. Nombre de récurrences par bassins pour plusieurs départements. p. 77
Fig. 3.4. Distribution mensuelle (**a**) et par décades (**b**) des événements. p. 79
Fig. 3.5. Répartition des 81 événements recensés au cours du mois de **mai**. p. 80
Fig. 3.6. Répartition des 99 événements recensés au cours du mois de **juin**. p. 80
Fig. 3.7. Répartition des 50 événements recensés au cours du mois de **juillet**. p. 81
Fig. 3.8. Répartition des 39 événements recensés au cours du mois d'**août**. p. 81
Fig. 3.9. Répartition mensuelle des 269 événements (1983-2005). p. 82
Fig. 3.10. Carte des dommages liés à des « *crues rapides* » (Douvinet, 2008). p. 89
Fig. 3.11. a et b) Implantation puis croissance des villes dans les fonds de vallée ; **c)** Une maîtrise de la vulnérabilité difficile : pavillon touché en 1997 (**c1)** présent en 2002 **(c2**). p. 93
Fig. 3.12. Une sensibilité sociale en constante augmentation. Période de construction et rôle joué sur la cinématique des écoulements lors de la crue du 28 juin 2005 à Hautot sur Mer (76). p. 94

Partie II

Chapitre 4

Fig. 4.1. Cumuls et durées des pluies à l'origine des « *crues rapides* » (1983-2005). p. 103
Fig. 4.2. Pluies enregistrées le 1er juin 2003 à la station de Deauville (14) p. 104
Fig. 4.3. Cumuls et durées des pluies relevées **a)** sur les stations du réseau officiel, **b)** d'après les images radars ; **c)** sur les stations bénévoles et/ou des agriculteurs (d'après les données « *CatNat* »). p. 104
Fig. 4.4. Typologie des épisodes pluvieux suivant leur intensité et leur extension spatiale. p. 105
Fig. 4.5. Localisation et répartition géométrique des 85 stations initialement choisies. p. 108
Fig. 4.6. Localisation et nom des postes pluviométriques retenus pour cette étude. p. 109
Fig. 4.7. Localisation et occurrence des **maxima de rang 1** sur les 85 stations (1983-2005). p. 111
Fig. 4.8. Localisation et occurrence des **maxima de rang 2** sur les 85 stations (1983-2005). p. 111
Fig. 4.9. Comparaison entre les maxima relevés sur les 85 stations (1983-2005). p. 113
Fig. 4.10. Nombre de jours où des pluies supérieures à 30 mm ont été mesurées. p. 115
Fig. 4.11/A. Nombre de jours où les précipitations mesurées par les 85 stations (1983-2005) sont supérieures à 30 mm pour les mois de mai et juin. p. 116
Fig. 4.11/B. Nombre de jours où les précipitations mesurées par les 85 stations (1983-2005) sont supérieures à 30 mm pour les mois de juillet et août. p. 117
Fig. 4.12. Nombre de jours où des pluies supérieures à 30 et à 40 mm ont été mesurées. p. 118
Fig. 4.13. Part des épisodes détectés en fonction des seuils d'intensité choisis sur les 85 stations. p. 119
Fig. 4.14. Episodes de pluies > 50mm et relation avec les « *crues rapides* » (1983-2005). p. 120
Fig. 4.15. Episodes de pluies > 50mm et relation avec les « *crues rapides* » (1983-2005). p. 120
Fig. 4.16. Cumuls des jour j et des 5 et 10 jours précédant les épisodes « *crues rapides* ». p. 121
Fig. 4.17. Répartition des maxima des trois premiers rangs sur les 85 stations. p. 122
Fig. 4.18. Nombre de maxima (trois premiers rangs) cumulés par année (1983-2005). p. 123
Fig. 4.19. Jours de pluies > 30 mm cumulés par année entre mai et août inclus (1983-2005). p. 124
Fig. 4.20. Nuages et pluies associées à un front froid et à un front chaud. p. 125
Fig. 4.21. Identification des situations synoptiques observées à 700 hPa le jour j de la date de recensement d'une « *crue rapide* » dans le nord de la France. p. 127
Fig. 4.22. **A/** Proportion d'événements pluvieux ayant généré des « *crues rapides* » (1983-2005), pour chaque classe principale de GWL et pour chaque GWT ; **B/** comparaison avec l'ensemble des circulations atmosphériques sur la même période. Représentation des 5 classes de GWT sous forme de flèches orientées (W ; NW et N ; NE et E ; S) et d'une flèche blanche au centre de la rose des vents pour les situations à centre d'action sur l'Europe Centrale (EC). p. 129

Chapitre 5

Fig. 5.1. Structure schématique simplifiée du Bassin Parisien. p. 135
Fig. 5.2. Profils topographiques et pendages des couches géologiques sur deux coupes. p. 136
Fig. 5.3. Croquis géomorphologique simplifié à échelle régionale. p. 137
Fig. 5.4. Opposition entre les plateaux mollement ondulés et les vallées à corniches typiques des paysages hérités des périodes périglaciaires. p. 139
Fig. 5.5. Profils en long et degré d'encaissement pour trois types de bassins. p. 140
Fig. 5.6. Carte des pentes réalisée à une échelle régionale. p. 141
Fig. 5.7. Saut d'ordre dans la classification de Strahler et localisation des types 1 et 2. p. 142

Fig. 5.8. Coexistence des deux portraits-types dans le bassin de la Durdent, en Seine-Maritime. p. 142
Fig. 5.9. Première typologie réalisée d'après une interprétation géomorphologique. p. 143
Fig. 5.10. Taille et dénivelée (rangées par ordre croissant) des 189 bassins versants étudiés p. 145
Fig. 5.11. Relations bivariées entre : **a)** la taille des bassins versants et l'indice de compacité ; **b)** la taille des bassins et le ratio de dénivelée ; **c)** entre la taille et l'indice d'étalement de Morton p. 146
Fig. 5.12. Bassins versants (< 10 km²) ayant des caractéristiques morphométriques spécifiques. p. 148
Fig. 5.13. Type de rivières associées aux cuestas. p. 150
Fig. 5.14. Un risque faible, voire inexistant : exemple choisi sur la cuesta du Pays d'Auge (14). p. 150
Fig. 5.15. Un risque « *crues rapides* » faible sur le front de cuesta du Pays de Thelle (60). p. 151
Fig. 5.16. Un risque disparate associé à une urbanisation variable dans les plateaux à corniche : exemple choisi dans la vallée de l'Aisne (02). p. 153
Fig. 5.17. Un risque élevé associé à une urbanisation intense dans un fond de vallée encaissée : exemple de la partie basse de l'Austreberthe (76). p. 154

Chapitre 6

Fig. 6.1. Dispersion des 189 bassins versants dans des contextes agricoles variés. p. 160
Fig. 6.2. Distribution spatiale de l'occupation du sol à l'échelle régionale p. 161
Fig. 6.3. Les 11 variables sélectionnées à partir des statistiques agricoles du RGA. p. 163
Fig. 6.4. Structuration de l'espace agricole et localisation des bassins touchés (1983-2005) p. 164
Fig. 6.5. Cartographie de l'aléa érosion des sols à l'échelle annuelle sur les huit départements. p. 168
Fig. 6.6. Graphique illustrant la variabilité de l'occupation du sol sur les 15 bassins étudiés. p. 171
Fig. 6.7. Liens entre la structure d'un bassin et l'organisation spatiale de son occupation du sol. p. 172
Fig. 6.8. Lien entre la morphologie et les pourcentages de surfaces boisées, enherbés et cultivées sur les bassins versants touchés par des « *crues rapides* » : **a)** type 1 ; **b)** type 2. p. 173
Fig. 6.9. Pourcentages des surfaces relatives à l'occupation du sol et la taille des bassins versants. p. 174
Fig. 6.10. Différentes configurations spatiales : exemples choisis dans l'Aisne et la Seine-Maritime. p. 175
Fig. 6.11. Comparaison des occupations du sol sur deux bassins touchés par le même épisode. p. 177
Fig. 6.12. Caractéristiques des crues et occupation du sol sur les deux bassins. p. 178
Fig. 6.13. Comparaison des occupations du sol de bassins touchés en milieu herbager. p. 179
Fig. 6.14. Caractéristiques des crues et occupation du sol sur les deux bassins. p. 179
Fig. 6.15. Comparaison des occupations du sol sur deux bassins touchés en milieu d'openfield. p. 180
Fig. 6.16. Caractéristiques des crues et occupation du sol sur les deux bassins. p. 180
Fig. 6.17. Localisation des formes érosives observées sur le bassin du Vendeuvre. p. 181
Fig. 6.18. Une influence variable de l'occupation du sol suivant les autres composantes. p. 182

Partie III

Chapitre 7

Fig. 7.1. Frise chronologique mentionnant les dates de création des indices morphométriques les plus connus en hydrologie et changements d'objectifs des études les utilisant. p. 193
Fig. 7.2. Construction de l'indice de compacité de Gravelius et de l'indice de circularité de Miller. p. 194
Fig. 7.3. Indices de développement de Saam (1998) et le « *lemniscate ratio* » de Chorley *et al.* (1957). p. 195
Fig. 7.4. Nouveaux indices créés à partir de l'ellipse équivalente (d'après Moussa, 1991). p. 197
Fig. 7.5. Construction et interprétation de la courbe hypsométrique d'un bassin versant (d'après les travaux de Strahler, 1952, 1957 ; Birot, 1955 ; Front, 2002 – modifié). p. 198
Fig. 7.6. Mesurer l'asymétrie de deux versants (d'après Delcaillau, 2001 – modifié). p. 199
Fig. 7.7. Hiérarchisation des réseaux selon trois méthodes d'ordination (modifié d'après Bravard et Petit, 2000). En gras, figurent les tronçons d'ordre 4 pour chaque méthode. p. 202
Fig. 7.8. Exemples de dénominations usitées pour décrire les chevelus (Le Pape, 1998). p. 203
Fig. 7.9. Typologie des 63 indices morphométriques classés en 4 catégories. p. 208
Fig. 7.10. Objectifs et limites d'utilisation pour les trois types d'indices. p. 211
Fig. 7.11. Trois modèles de connaissance pour caractériser l'évolution du réseau. p. 212
Fig. 7.12. Les 14 combinaisons possibles pour l'agencement d'un réseau à 5 sources. p. 214
Fig. 7.13. Méthode de construction de la « *width function* ». p. 215
Fig. 7.14. Représentations de la « *width fonction* » de Shreve (1969) sur le bassin du Wando (d'après Richards-Perou, 2002) : un outil graphique pour traduire l'évolution de la forme d'un bassin. p. 215
Fig. 7.15. a) Représentation de la topologie du réseau par la méthode de Lukasiewick (0 pour un bief intérieur ; 1 pour un bief extérieur) ; **b)** méthode de construction (Oguz, 2001). p. 216
Fig. 7.16. Méthode de construction de la « *fonction-aire normalisée* » : pour chaque isochrone on définit une vitesse d'écoulement et un temps de séjour (d'après le modèle HYDRAM). p. 216

Chapitre 8

Fig. 8.1. Emboîtement des échelles « *verticales* » et « *horizontales* » au sein d'une pyramide de complexité ; concepts utilisés pour les décrire (modifié d'après Heudin, 1998) et description des différents niveaux adaptés à cette étude . p. 221
Fig. 8.2. Différentes mailles carrées (A), triangulaires (B), hexagonales (C). p. 225
Fig. 8.3. Règles de voisinage dans une matrice carrée : A / Moore ; B / Von Neumann ; C/ Moore de rayon 2 (ou d'ordre 2) ; D / Von Neumann de rayon 2. p. 226
Fig. 8.4. Construction du maillage à partir d'un Modèle Numérique de Terrain. p. 229
Fig. 8.5. Découpage du MNT en cellules triangulaires régulières, pentes associées et types d'écoulement intégrés à travers le graphe d'écoulement. p. 230
Fig. 8.6. Coefficient de transition pour la répartition des écoulements vers l'aval. p. 231
Fig. 8.7. Cheminement de l'écoulement de surfaces sur 5 cellules. p. 232
Fig. 8.8. Simulation des écoulements de surface sur deux bassins de même taille. p. 234
Fig. 8.9. Indices créés à partir des surfaçogrammes. p. 235
Fig. 8.10. Cartographie des distances des cellules par rapport à l'exutoire. p. 236
Fig. 8.11. Cartographie de plusieurs bandes de cellules situées à égale distance de l'exutoire. P. 236
Fig. 8.12. Simulation des écoulements de surface avec l'effet de la pente sur deux bassins. p. 237
Fig. 8.13. Cartographie des écoulements de surface sur deux MNT de résolution différente p. 238

Chapitre 9

Fig. 9.1. Emergence de la structuration des axes d'écoulement au cours du processus itératif. p. 243
Fig. 9.2. Relations entre Qmax (point de débit du surfaçogramme), Dv (durée de la simulation) et Qmoy (débit moyen) versus la taille des bassins. p. 244
Fig. 9.3. Importance des écarts entre DQmax versus la taille des bassins. p. 245
Fig. 9.4. Cartographie des cumuls de surfaces passés en chaque cellule pour les 4 bassins. p. 246
Fig. 9.5. *Surfaçogrammes* des quatre bassins et contributions des différents sous bassins. p. 247
Fig. 9.6. Bande de cellules situées à égale distance du point 1 (amont de SMB). p. 247
Fig. 9.7. L'indice **P** versus la taille des bassins versants. p. 249
Fig. 9.8. Trajectoires de l'indice **P** au sein de bassins de même taille. p. 250
Fig. 9.9. Calcul et signification des valeurs obtenues avec l'indice IE. p. 251
Fig. 9.10. Trajectoire et évolution de l'indice **IE** au sein des bassins versants. p. 252
Fig. 9.11. Cartographie de l'indice IE sur les trois bassins étudiés et émergence des cellules en amont desquelles le réseau est structurellement efficace. p. 253
Fig. 9.12. Différentes configurations spatiales où un indice IE supérieur à 50 est détecté. p. 254
Fig. 9.13. Effet « *chou-fleur* » à l'origine d'une structuration du réseau efficace. p. 255
Fig. 9.14. Différentes configurations spatiales où un indice IE supérieur à 50 est détecté. p. 257
Fig. 9.15. Différentes configurations spatiales où un indice IE supérieur à 50 est détecté. p. 258
Fig. 9.16. *Morphogrammes* des quatre bassins et contributions des différents sous bassins. p. 259
Fig. 9.17. Cartographie des débits de surfaces passées dans chaque cellule sur trois bassins. p. 260
Fig. 9.18. Profils en long et pics des morphogrammes simulés sur différents bassins du type 1. p. 261
Fig. 9.19. Cartographies des pics des *morphogrammes* et courbes de niveau sur deux bassins. p. 262
Fig. 9.20. Différence entre le surfaçogramme et le morphogramme sur le bassin de Milleville. p. 263

Partie IV

Chapitre 10

Fig. 10.1. Intégration progressive des paramètres au sein des simulations. p. 271
Fig. 10.2. Moteur hydrologique dans chaque cellule (modifié d'après Langlois, 2007). p. 273
Fig. 10.3. a) Choix des coefficients de ruissellement ; **b)** Structuration hiérarchique pour définir les capacités d'infiltration pour différentes classes (modifié d'après Cerdan, 2001). p. 274
Fig. 10.4. Valeurs implémentées **(a, b, c)** et comparaison entre les écoulements observés (**c)** et les écoulements simulés **(d, e)** sur St Martin (modifié d'après Vandewiele, 1998 ; Delahaye, 2002). p. 277
Fig. 10.5. Valeurs implémentées (**a, b, c**) et comparaison entre les écoulements observés (**c)** et les écoulements simulés (**d, e**) sur le bassin de Villers-Ecalles (modifié d'après Delahaye *et al*, 2007). p. 279
Fig. 10.6. Photos prises au lendemain de la crue du 7 juin 2007 sur le bassin d'Estreux (59). p. 280
Fig. 10.7. Valeurs implémentées (**a, b, c**) et comparaison entre les écoulements observés (**c)** et les écoulements simulés (**d, e**) sur le bassin d'Estreux (59). p. 281
Fig. 10.8. Valeurs implémentées (**a, b, c**) et écoulements simulés (**d, e**) sur le bassin de Callenville. p. 282
Fig. 10.9. Zones de départ du ruissellement pour deux types de pluies sur le bassin de St Martin (A) et Callenville (B). Les capacités d'infiltration ne changent pas entre les deux simulations : le but ici est de détecter les espaces de production en jouant uniquement sur l'intensité des pluies. p. 287

Fig. 10.10. Simulations du ruissellement : 1/ avec l'occupation du sol réelle (hiver 2006) ; 2/ intégrant les changements d'occupation du sol de certaines parcelles. p. 289

Chapitre 11

Fig. 11.1. Localisation des exutoires potentiellement sensibles à l'aléa « *crues rapides* ». p. 293
Fig. 11.2. Croisement entre l'aléa et les espaces bâtis pour définir le risque « *crues rapides* ». p. 294
Fig. 11.3. Cartographie des exutoires, faiblement ou densément urbanisés, exposés à l'aléa « *crue rapide* » potentiel, et identifiés à partir de critères morphologiques. p. 295
Fig. 11.4. Liens entre l'intensité de l'aléa et l'intensité de la vulnérabilité. p. 297
Fig. 11.5. Croisement de l'aléa et les enjeux identifiant différents niveaux de risque. p. 298
Fig. 11.6. Liens entre l'indice IE et les zones bâties sur le bassin de St Martin. p. 299
Fig. 11.7. Liens entre l'indice IE et les zones bâties sur le bassin d'Hautot-sur-Mer. p. 300
Fig. 11.8. Cartographie de l'indice IE et localisation des zones bâties sur différents bassins. p. 302
Fig. 11.9. Liens entre l'indice IE et les zones d'habitat en situation d'homothétie interne. p. 302
Fig. 11.10. Liens entre l'indice IE et les zones d'habitat : exemple à l'ouest de Dieppe (76). p. 304
Fig. 11.11. Liens entre l'indice IE et les zones d'habitat dans la vallée de la Durdent (76). p. 305
Fig. 11.12. Carte de localisation des aménagements (réalisés et en cours d'étude) sur les bassins de Sommesnil et du Hanouard (modifié d'après les données du SMBV de la Durdent, 2006). p. 306

Conclusion générale

Fig. 1. Trois niveaux de complexité imbriqués à travers les échelles. p. 315

Liste des tableaux

Partie I

Chapitre 1

Tab. 1.1. Distinction des formes d'érosion en fonction de leur taille et de leur localisation. p. 39
Tab. 1.2. Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules de sol et des caractéristiques du ruissellement (d'après Auzet *et al.* 1995, *in* Delahaye, 2002). p. 40
Tab. 1.3. Définitions des termes utilisés dans la littérature et dans les textes réglementaires. p. 42
Tab.1.4. Comparaison entre quelques « *crues rapides* » du nord et du sud de la France. p. 45

Chapitre 2

Tab. 2.1. Nombre d'épisodes et de déclarations entre mai et août d'après la base « *CatNat* ». p. 54
Tab. 2.2. Cotes des versements consultables au CAC (Fontainebleau) et quelques exemples de pré-versements consultables sur la base PRIAM3 à la DDSC (Asnières). p. 62
Tab. 2.3. Résultats obtenus après l'analyse détaillée des dossiers « *CatNat* ». p. 65
Tab. 2.4. Nombre d'épisodes et bassins versants touchés par des « *crues rapides* ». p. 68

Chapitre 3

Tab. 3.1. Nombre de bassins touchés, classés par année et par département (1983-2005). p. 75
Tab. 3.2. Nombre de récurrences d'événements sur les 191 bassins touchés (1983-2005). p. 78
Tab. 3.3. Répartition des « *crues rapides* » par décade et par département. p. 79
Tab. 3.4. Estimations financières des dégâts matériels pour les événements les plus coûteux dans chaque département (d'après les dossiers « *CatNat* »). p. 85
Tab. 3.5. Dégâts humains recensés lors des « *crues rapides* » survenues dans le nord de la France (1983-2005). p. 86
Tab. 3.6. Gravité des inondations selon la Mission d'Inspection de l'Environnement (MISE, 2001). p. 87
Tab. 3.7. Evaluation de l'aléa en croisant son intensité et son occurrence spatiale (MEDAD, 2006). p. 88
Tab. 3.8. Classification des événements observés en été sur le BV de Sannerville (modifié d'après Meyer, 2001). p. 88
Tab. 3.9. Données disponibles à l'échelle des 189 bassins versants touchés. p. 88
Tab. 3.10. Titres des Unes de presse évoquant plusieurs « *crues rapides* ». p. 91

Partie II

Chapitre 4

Tab. 4.1. Cumuls pluviométriques relevés pour les 68 épisodes pluvieux connus. p. 106
Tab. 4.2. Pourcentage de données pour les 34 stations où les séries sont incomplètes. p. 108
Tab. 4.3. Maxima de rangs 1 et 2 relevés entre mai et août inclus (1983-2005). p. 112
Tab. 4.4. Episodes « *crues rapides* » communs aux différents maxima relevés sur les 85 stations. p. 114
Tab. 4.5. Episodes « *crues rapides* » ou « *sans crues rapides* » détectés pour le seuil 50 mm. p. 120
Tab. 4.6. Episodes « *crues rapides* » ou « *sans crues rapides* » détectés pour le seuil 50 mm. p. 120
Tab. 4.7. Types de circulations associés aux épisodes à l'origine des « *crues rapides* ». p. 131

Chapitre 5

Tab. 5.1. Choix des paramètres morphométriques étudiés et formules/logiciels utilisés. p. 144

Chapitre 6

Tab. 6.1. Contribution des variables suivant les % de variabilité des 4 axes factoriels. p. 164
Tab. 6.2. Occupation du sol sur 15 bassins versants classés par ordre croissant de taille. p. 170

Partie III

Chapitre 7

Tab.7.1. Noms, formules et sources des indices de forme couramment utilisés en hydrologie (P = périmètre ; A = Surface ; Lb = longueur maximale du cours d'eau ; r = rayon du cercle). p. 196
Tab.7.2. Noms, formules et sources des indices de volume couramment utilisés. p. 201
Tab.7.3. Noms, formules et sources des indices de réseau couramment utilisés. p. 204
Tab.7.4. Noms, formules et sources des « *indices croisés* » couramment utilisés. p. 207
Tab.7.5. Nombre de combinaisons possibles pour l'agencement d'un réseau en fonction d'un nombre de sources donné (d'après Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997) p. 214

Chapitre 9

Tab. 9.1. Présentation des 4 bassins expérimentaux et valeurs des indices morphosynthétiques. p. 246
Tab. 9.2. Répartition des différents bassins suivant leur efficacité structurelle. p. 256
Tab. 9.3. Répartition des types de bassins en fonction de leur efficacité structurelle. p. 257
Tab. 9.4. Valeurs obtenues pour les simulations 3D sur les 4 bassins versants. p. 259

Partie IV

Chapitre 10

Tab. 10.1. Comparaison des valeurs estimées (Cemagref) et simulées (*RuiCells*). p. 278
Tab. 10.2. Comparaison des valeurs estimées (Cemagref) et simulées (*RuiCells*). p. 278
Tab. 10.3. Capacités d'infiltration et pluies d'imbibition ajustées au 16 juin 1997 (Delahaye, 2002). p. 285
Tab. 10.4. Comparaison entre les simulations obtenues à partir des coefficients de ruissellement ou les hauteurs d'imbibition et les capacités d'infiltration sur les bassins de St-Martin et Villers. p. 285

Liste des annexes

Partie I

Chapitre 1

Annexe 1.1. Compléments sur l'évènement de Trouville (14) qui a eu lieu le 1er juin 2003. p. 340

Chapitre 2

Annexe 2.1. Cotes des archives versées en pré-archivage à la DDSC (état des lieux fin 2005). p. 341
Annexe 2.2. Quelques rappels sur la procédure d'indemnisation du régime « *CatNat* ». p. 342

Chapitre 3

Annexe 3.1. Carte des dommages / nature des sinistres sur les 189 bassins étudiés. p. 344

Partie II

Chapitre 4

Annexe 4.1. Quelques maxima comparés à la normale climatique (1961-1990). p. 345
Annexe 4.2. Comparaison entre les maxima de rang 2 et 3. p. 345
Annexe 4.3. Distribution du nombre de jours où les pluies sont supérieures à 40 mm. p. 346
Annexe 4.4. Distribution dans le temps des maxima des trois premiers ordres. p. 347
Annexe 4.5. Répartition mensuelle des trajectoires des masses d'air. p. 348
Annexe 4.6. Catalogue des GWL quotidiens. p. 348

Chapitre 5

Annexe 5.1.Valeurs des indices calculés sur les 189 bassins touchés. p. 349
Annexe 5.2. Résultats obtenus par une ACP-CAH à partir des indices morphométriques. p. 350
Annexe 5.3. Principes du découpage automatique des bassins versants. p. 354

Chapitre 6

Annexe 6.1. Bases de données spatialisées sur le nord de la France et coût de leur acquisition. p. 354
Annexe 6.2. Rappel des principes de construction d'une ACP-CAH. p. 355
Annexe 6.3. Méthode et données utilisées pour la carte de l'aléa érosion des sols. p. 356
Annexe 6.4. Cartes saisonnières de l'aléa érosion des sols (printemps/été). p. 357
Annexe 6.5. Fiabilité des données *Corine Land Cover* sur le bassin d'Aizelles (02). p. 358

Partie III

Chapitre 8

Annexe 8.1. Applications cellulaires en géographie physique et environnementale. p. 359
Annexe 8.2. Paramètres utilisés pour la simulation des effets de pente. p. 361
Annexe 8.3. Tutoriel et prise en main du logiciel pour passer du MNT aux simulations. p. 364

Chapitre 9

Annexe 9.1. Contributions des sous bassins par rapport au surfaçogramme mesuré à l'exutoire. p. 365
Annexe 9.2. Liste des bassins structurellement bien organisés sur les 189 bassins touchés. p. 366

Partie IV

Chapitre 10

Annexe 10.1. Comparaison entre les résultats des simulations obtenues avec RuiCells et la méthode rationnelle sur un événement test p. 368

Table des matières

Introduction générale **p. 11**

Partie I – Des « *crues rapides* » en périodes printanière et estivale dans les régions de grande culture du nord de la France – Constats et besoins de recherche **p. 21**

Introduction de la première partie **p. 22**

Chapitre 1 – Présentation des phénomènes et éléments de définition **p. 23**

Introduction **p. 24**
1.1. Retours d'expérience : des crues rapides et violentes **p. 24**
1.1.1. La crue du 16 juin 1997 sur le bassin de St Martin-de-Boscherville (76) p. 25
1.1.2. Les crues du 9 et 10 mai 2000 sur St-Léonard et Barentin (76) p. 27
1.1.3. Les crues du 1er juin 2003 dans la basse vallée de la Touques (14) p. 28
1.1.4. La crue rapide du 28 juin 2005 sur le vallon d'Hautot-sur-Mer (76) p. 30
1.1.5. Premières conclusions p. 32
1.2. Caractères communs à toutes les catastrophes **p. 32**
1.2.1. Des crues rapides apparaissant dans des « *vallons secs* » p. 33
1.2.2. Une forte concentration en éléments solides et des dégâts importants p. 35
1.2.3. Un système érosif rapidement développé sur de courtes distances p. 39
1.3. Précisions terminologiques : « *coulées boueuses* », « *crues rapides* » et « *phénomènes hyper-concentrés* » **p. 41**
1.3.1. Préambule : une absence de consensus terminologique p. 41
1.3.2. Des « *coulées de boue* » aux « *crues rapides* » : éléments de définition p. 41
1.3.3. Des points communs avec les« *crues rapides* » du sud de la France ? p. 44
1.3.4. Caractérisation rhéologique : des « *écoulements hyper-concentrés* » p. 46
1.3.5. Choix du terme à utiliser p. 49
Conclusions du chapitre 1 **p. 49**

Chapitre 2 – Les dossiers « *CatNat* » comme supports d'analyse pour un inventaire des « *crues rapides* » **p. 51**

Introduction **p. 52**
2.1. Un inventaire basé sur la sinistralité **p. 52**
2.1.1. Création d'une base de données « *Inondations et coulées de boue* » en périodes printanière et estivale pour les régions du nord de la France p. 52
2.1.2. Interprétation de la base « *CatNat* » et spatialisation des données p. 54
2.2. Critiques des sources et limites des données « *CatNat* » pour leur exploitation **p. 56**
2.2.1. Une prise de décision avant tout politique p. 56
2.2.2. Un seuil pluviométrique arbitraire pour des pluies orageuses p. 57
2.2.3. Des problèmes liés à l'architecture de la base de données p. 58
2.2.4. Des procédures d'indemnisation parallèles p. 59
2.3. Affiner la méthode d'inventaire des « *crues rapides* » **p. 60**
2.3.1. Contrôle des données et informations associées p. 60
2.3.2. Lieux et durées d'archivage des dossiers « *CatNat* » p. 61
2.3.3. Bilan : les étapes incontournables de la méthode d'inventaire p. 63
2.4. Spatialisation des « *crues rapides* » à échelles fines **p. 64**
2.4.1. Distinctions entre « *ruissellements localisés* » et « *crues rapides* » p. 64
2.4.2. Importance du second traitement p. 65
2.4.3. Cartographie des bassins versants touchés (1983-2005) p. 66
2.4.4. Structure et mise à jour de l'inventaire p. 69
Conclusions du chapitre 2 **p. 71**

Chapitre 3 – Le risque « *crues rapides* » dans les régions du nord de la France : contexte et état des lieux **p. 73**

Introduction **p. 74**
3.1. Distributions spatio-temporelles des événements **p. 74**
3.1.1. Evolution dans le temps (1983-2005) p. 74
3.1.2. Récurrence des événements par bassin versant p. 77
3.1.3. Répartition des « *crues rapides* » par décades p. 78
3.1.4. Distribution spatiale et temporalités p. 79
3.2. Ampleur des dégâts associés aux « *crues rapides* » **p. 83**
3.2.1. Coût des dommages matériels p. 84
3.2.2. Drames humains liés à la mobilité des personnes en temps de crise p. 86
3.2.3. Hétérogénéité des dommages sur les 189 bassins touchés p. 87
3.3. Regards croisés sur le risque « *crues rapides* » **p. 90**
3.3.1. De la fatalité au catastrophisme journalistique … p. 90
3.3.2. Réponse des expertises scientifiques p. 92
Conclusions du chapitre 3 **p. 95**

Synthèse de la première partie **p. 97**

Partie II – Seuils de déclenchement et facteurs de prédisposition aux « *crues rapides* » **p. 99**

Introduction de la deuxième partie **p. 100**

Chapitre 4 – Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « *crues rapides* » **p. 101**

Introduction **p. 102**
4.1. Caractéristiques des pluies à l'origine des « *crues rapides* » **p. 103**
4.1.1. Des cumuls de pluies élevés (> 50 mm) sur de courtes durées (< 15 h) p. 103
4.1.2. Deux types d'épisodes pluvieux distincts p. 105
4.1.3. Premières conclusions et résultats attendus p. 107
4.2. Etude du seuil de déclenchement des phénomènes **p. 107**
4.2.1. Choix et limites des données p. 107
4.2.2. Traitements et cartographie des maxima quotidiens (1983-2005) p. 110
4.2.3. Liens entre les maxima et les épisodes « *crues rapides* » p. 114
4.2.4. Distribution des pluies supérieures à des seuils donnés p. 115
4.2.5. Liens entre l'étude « *par seuil* » et les épisodes « *crues rapides* » p. 119
4.3. Evolution de l'aléa pluviométrique (1983-2005) **p. 122**
4.3.1. Distribution des maxima dans le temps p. 122
4.3.2. Evolution des pluies supérieures à 30 mm p. 123
4.4. Types de circulations associées aux « *crues rapides* » **p. 124**
4.4.1. Méthode et données utilisées p. 124
4.4.2. Quelques points de repères théoriques p. 124
4.4.3. Structures et origines des masses d'air associées au jour j p. 125
4.4.4. Typologies sur j_{-3} d'après la méthode de Hess-Brezowsky p. 128
Conclusions du chapitre 4 **p. 131**

Chapitre 5 – Caractéristiques morphologiques et portraits types des bassins versants sensibles aux « *crues rapides* » **p. 133**

Introduction **p. 134**

5.1. Caractéristiques du contexte géomorphologique régional **p. 134**
5.1.1. Le Bassin Parisien, héritage d'une longue accumulation sédimentaire p. 135
5.1.2. Formes et reliefs hérités associés aux processus fluviatiles p. 135
5.2. Esquisses d'une première typologie **p. 140**
5.3. Validation par une approche quantitative ? **p. 144**
5.3.1. Méthodologie et données utilisées p. 144
5.3.2. Mise en opposition des deux portraits-types morphologiques p. 145
5.4. Essai de cartographie des bassins « *sensibles* » (1-10 km²) **p. 147**
5.5. Discussion **p. 149**
5.5.1. Zonation des secteurs « *sensibles* » autour des cuestas p. 149
5.5.2. Fragmentation du risque dans les plateaux à corniche p. 152
5.5.3. Concentration du risque dans les vallées encaissées du Pays de Caux p. 152
Conclusions du chapitre 5 p. 154

Chapitre 6 – Influence de l'occupation du sol sur la sensibilité des bassins touchés par des « *crues rapides* » **p. 157**

Introduction **p. 158**
6.1. Caractéristiques du contexte agricole régional **p. 159**
6.1.1. Données utilisées p. 159
6.1.2. Structuration spatiale de l'occupation du sol p. 159
6.1.3. Distribution des 189 bassins versants touchés p. 160
6.1.4. Etude des usages du sol p. 163
6.2. Sensibilité à l'aléa érosion des sols **p. 167**
6.3. Examen des statistiques locales **p. 169**
6.3.1. Choix et limites des données p. 169
6.3.2. Disparité des occupations du sol moyennes p. 170
6.3.3. Relations entre l'occupation du sol et la morphologie p. 172
6.3.4. Diversité des configurations internes p. 174
6.4. Etudes de cas à l'échelle « *événementielle* » **p. 176**
6.4.1. Poids de l'occupation du sol sur deux bassins de même taille et soumis aux mêmes conditions pluviométriques : les crues du 16 juin 1997 p. 177
6.4.2. Similitudes entre deux petits bassins versants *a priori* peu sensibles aux *« crues rapides »* : les exemples du 1er juin 2003 et du 28 juin 2005 p. 178
6.4.3. Points communs des bassins situés en milieu d'*openfield* : les exemples du 7 juin 2007 à Estreux (59) et du 8 août 2007 à Vendeuvre (14) p. 179
6.4.4. Discussion
Conclusions du chapitre 6 **p. 183**

Synthèse de la deuxième partie **p. 185**

Partie III – Vers une mesure dynamique de l'influence de la morphologie sur les écoulements de surface **p.187**

Introduction de la troisième partie **p. 188**

Chapitre 7 – Les indices morphométriques à l'épreuve du temps **p. 189**

Introduction **p. 190**
7.1. Place de la morphométrie en hydrologie **p. 190**
7.2. Etat des connaissances : Type d'indices et composantes morphologiques associées p. 194
7.2.1. Des indices de forme pour décrire l'allure et la forme du périmètre p. 194
7.2.2. Des indices de volume pour caractériser la distribution du relief p. 197
7.2.3. Des indices de réseau pour mesurer son degré de hiérarchisation p. 202

7.2.4. Des indices « *croisés* » combinant deux variables morphologiques p. 205
7.3. Limites d'utilisation des méthodes classiques p. 209
7.3.1. Héritage d'une géomorphologie structurale descriptive p. 209
7.3.2. Critiques vives de la part des géomorphologues français p. 209
7.3.3. Problèmes liés à une approche « *cloisonnée* », « *statique* » et « *séparée* » p. 210
7.4. Orientation vers des méthodes plus synthétiques p. 212
7.4.1. Règles de développement et modèles d'organisation des réseaux p. 212
7.4.2. Lois de distribution des biefs p. 213
7.4.3. Fonction-largeur et fonction aire-distance p. 214
Conclusions du chapitre 7 p. 217

Chapitre 8 – Un automate cellulaire pour simuler l'influence de la morphologie sur les écoulements de surface : Développements méthodologiques p. 219

Introduction
8.1. Point de vue théorique : jeux d'interactions et émergences p. 220
8.1.1. « *Structure organisationnelle* » et « *hiérarchie emsembliste* » p. 221
8.1.2. « *Emergence* » et « *auto-organisation* » p. 222
8.1.3. Le « *bassin versant* » perçu comme « *un système spatial complexe* » p. 223
8.2. Des automates cellulaires pour la simulation de processus spatiaux : règles de base et applications p. 223
8.2.1.Arrivée des premiers automates en géographie p. 224
8.2.2. Un langage commun à tous les ACs p. 225
8.2.3.Les ACs et la géographie : avantages et modifications apportées p. 227
8.3. Structure et fonctionnement de l'automate *RuiCells* p. 228
8.3.1. Construction et particularités du maillage p. 228
8.3.2. Principe de fonctionnement p. 231
8.3.3. Dynamique du système p. 232
8.4. Développements méthodologiques p. 233
8.4.1. Cartographies des écoulements en tout point de l'espace p. 233
8.4.2. Indices morphosyntéhtiques crées à partir des surfaçogrammes p. 234
8.4.3. Cartographies des isodistances (2D) p. 235
8.4.4. Evaluer les effets des pentes sur les écoulements de surface (3D) p. 237
8.4.5. Sensibilité des résultats p. 238
Conclusions du chapitre 8 p. 239

Chapitre 9 – Influence des structures spatiales sur la dynamique hydrologique : émergences et jeux d'échelles p. 241

Introduction p. 242
9.1. Effets de forme et émergence de « *signatures surfaciques* » (2D) à l'échelle globale des bassins versants p. 242
9.1.1. Mise à jour de la structuration interne des bassins p. 242
9.1.2. Effets de taille et lois d'échelle au niveau macro p. 243
9.1.3. Des « *signatures surfaciques* » révélatrices des configurations internes p. 245
9.1.4. Remise en cause du « *bassin versant* » comme unité homogène p. 248
9.2. Mesurer l'efficacité structurelle d'un réseau en tout point de l'espace : une nouvelle méthode de caractérisation p. 248
9.2.1. A la recherche d'un indicateur synthétique p. 248
9.2.2. Proposer un nouvel indice d'efficacité structurelle : l'indice IE p. 249
9.2.3. Classification des bassins en fonction de leur efficacité structurelle p. 253
9.3. Influence des pentes sur le système morphologique p. 258
9.3.1. Des réponses lissées et plus étalées dans le temps p. 258
9.3.2. Mise en opposition des deux portraits types morphologiques p. 260
9.3.3. Quantifier l'efficacité du système morphologique avec un indice IEP p. 262
Conclusions du chapitre 9 p. 263

Synthèse de la troisième partie p. 265

Partie IV – Vers une cartographie des espaces « *sensibles* » p. 267

Introduction de la quatrième partie p. 268

Chapitre 10 - Vers une meilleure prise en compte des interactions spatiales dans le fonctionnement des hydrosystèmes p. 269

Introduction p. 270
10.1. La simulation comme outil d'expérimentation p. 271
10.1.1. Importance de la démarche exploratoire p. 271
10.1.2. Variables implémentées p. 272
10.1.3. Apports et contraintes des simulations p. 275
10.2. Mesurer le poids des interactions spatiales sur la dynamique du ruissellement : validations et expérimentations p. 276
10.2.1. Etude des simulations obtenues sur le bassin de St-Martin de B. (76) p. 276
10.2.2. Résultats obtenus sur le bassin de Villers-Ecalles (76) p. 278
10.2.3. Essais de simulation sur deux bassins « *extrêmes* » p. 280
10.2.4. Discussions p. 283
10.3. Seuils de fonctionnement et jeux d'échelles p. 284
10.3.1. Simulation du ruissellement en utilisant des capacités d'infiltration : une transposition délicate pour les phénomènes orageux p. 284
10.3.2. Tests et validations : l'épisode du 16 juin 1997 p. 285
10.3.3. Interactions entre les zones de production à travers les échelles : une dynamique spatiale « *complexe* » p. 286
Conclusions du chapitre 10 p. 288

Chapitre 11 – Spatialisation des « *zones à risque* » à différentes échelles p. 291

Introduction p. 292
11.1. Identification des zones « *à risque* » à l'échelle régionale p. 292
11.1.1. Localisation des exutoires potentiellement sensibles à l'aléa p. 292
11.1.2. Croisement avec les enjeux p. 294
11.1.3. Vers une cartographie du risque probable p. 297
11.1.4. Liens avec les bassins versants touchés (1983-2005) p. 297
11.2. Spatialisation du risque à échelle fine p. 299
11.2.1. Liens entre les indices IE et les zones sinistrées : retours d'expérience p. 299
11.2.2. Diversité des configurations internes p. 301
11.2.3. Discussion p. 303
11.3. Vers la mise en place d'un « *diagnostic du risque* » p. 304
Conclusions du chapitre 11 p. 307

Synthèse de la quatrième partie p. 309

Conclusion générale p. 311

Références bibliographiques p. 319

Annexes p. 339

Liste des figures, tableaux et annexes p. 369

Titre de la thèse

Les bassins versants sensibles aux « *crues rapides* » - Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes.

Résumé

En raison de leur caractère torrentiel, les « *crues rapides* » qui apparaissent en périodes printanière et estivale dans les régions du nord de la France constituent aujourd'hui la forme la plus originale et la plus dangereuse des inondations rencontrées dans ces régions. Le poids des activités humaines dans le fonctionnement de ces crises hydrologiques est incontestable. Ces crues turbides prennent naissance sur des territoires agricoles où les espaces cultivés ne cessent de se développer. L'urbanisation croissante et la place du réseau routier dans les axes majeurs d'écoulement aggravent la rapidité des flux et la vulnérabilité des biens et des personnes. Afin d'améliorer la connaissance sur ces événements, un inventaire a été réalisé à partir des dossiers « *CatNat* ». L'analyse comparative menée sur les 189 bassins versants recensés (1983-2005) a permis de dégager l'influence de la morphologie à différentes échelles. La vitesse de concentration de l'écoulement rapide est principalement liée à la combinaison entre le système de pentes, l'organisation des réseaux de talwegs et la forme des bassins versants. Il n'existait cependant aucune méthode permettant de mesurer, de manière synthétique et continue, le rôle de cette composante sur la dynamique hydrologique d'un bassin versant. Les approches quantitatives se sont limitées à des mesures séparées des composantes morphologiques (indices de compacité, rapport de confluence d'Horton, courbe hypsométrique…). En s'appuyant sur la théorie des systèmes complexes, et en particulier sur les automates cellulaires, il a été possible de développer des méthodes permettant de quantifier l'efficacité de la structuration en trois dimensions du « *bassin versant* ». L'adaptation de ces nouvelles méthodes d'analyse spatiale, encore peu employées en géomorphologie, nécessitera une réflexion sur la validité des outils et la pertinence des résultats en réintégrant progressivement les autres variables de l'hydrosystème. Tous ces résultats aboutissent à la réalisation de différentes cartes de sensibilité dans ces régions du nord de la France.

Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Mots-clés (indexation Rameau) : Inondations -- Parisien, Bassin (nord ; France) – Géomorphologie – Risques naturels – Cartes – Automates cellulaires – Systématique – Thèses et écrits académiques.

Mots-clés (indexation libre) : Crues rapides -- Bassin Parisien – Morphologie -- Automates cellulaires -- Systèmes Complexes.

Title of the Ph.D Thesis

« *Flash floods* » in the Paris Basin watersheds – Study of the structure and dynamic of complex spatial systems

Abstract

"Flash floods" occurring on the loamy plateaux of the Paris Basin, in the north of France, are the most original and dangerous form of floods encountered in this area because of their torrential nature. The human impact on these events is indisputable as they usually originate in agricultural ploughed areas. The increasing urbanization as well as the road network located in the thalweg of the valleys leads to faster water flows and a higher vulnerability of societies. To better assess occurrence of these events, watersheds have been located thanks to the French *CatNat* data base. The morphological organization of the watershed between forms, slopes and drainage networks, plays a key role on the *"flash floods"* dynamics and on the water flow concentration along pathways. Therefore, the traditional quantitative methods usually describe separately each morphological component (index of compacity of Gravelius, Horton ratio ordination, longitudinal profile section, hypsometric curve, etc), and none of them enables to estimate, in a synthetic and dynamic ways, the influence of the spatial organization of those three morphological component. Based on the complex systems theory, it is now possible to measure the 3D organization of the catchment area. The methodological implications of this work are very relevant as the tools involved were not currently used by geomorphologists or hydrologists at the beginning of this research. The results obtained and the validity of these spatial analysis methods will have to be discussed at the end of this work, progressively integrating other variables in simulations. All these results encourage maps of sensibility in these areas.

Keywords (Rameau indexing): Floods – Parisien, Bassin (nord; France) – Geomorphology – Natural risks – Maps – Cellular Automata – System analysis – Dissertations, Academic.

Keywords (free indexing): Flash floods -- Paris Basin -- Catchment morphology -- Cellular Automata -- Complex Systems.

Laboratoire GEOPHEN (*GEOgraphie Physique en Environnement*)
UMR LETG (*Littoral, Environnement, Télédétection et Géomatique*) 6554 CNRS
Université de Caen Basse-Normandie,
Sous-sol du Bâtiment Accueil,
Esplanade de la Paix, BP 5186
14032 CAEN CEDEX 2