



HAL
open science

Cartographies préventives du risque lié aux ” crues rapides ” dans le nord de la France

Johnny Douvinet, Daniel Delahaye, Patrice Langlois

► **To cite this version:**

Johnny Douvinet, Daniel Delahaye, Patrice Langlois. Cartographies préventives du risque lié aux ” crues rapides ” dans le nord de la France. Nouvelles rencontres de ThéoQuant, Mar 2009, Besançon, France. pp.1-14. halshs-00614880

HAL Id: halshs-00614880

<https://shs.hal.science/halshs-00614880v1>

Submitted on 1 Sep 2011

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.

Cartographies préventives du risque lié aux « crues rapides » dans le nord de la France

Johnny Douvinet¹, Daniel Delahaye², Patrice Langlois³

¹ UMR 6012 ESPACE, CNRS / Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse
74 rue Louis Pasteur, 84029 Avignon Cedex 1, France
johnny.douvinet@univ-avignon.fr

² UMR 6554 LETG, Laboratoire Géophen, CNRS / Université de Caen Basse-Normandie
Esplanade de la Paix, 14032 Caen cedex 18, France

³ Laboratoire MTG, UMR 6266 IDEES, CNRS / Université de Rouen
Rue Thomas Becket, 76130 Mont-Saint-Aignan, France

MOTS - CLÉS

Crues rapides
Risque
Bassin parisien
Morphologie
Cartographies
préventives

RÉSUMÉ

Le risque lié aux « crues rapides » printanières et estivales constitue une préoccupation grandissante dans les régions du nord de la France (bassin parisien). Cependant, peu d'études ont été menées sur ce type de phénomènes et les analyses hydrologiques se sont essentiellement focalisées sur les inondations par débordement ou par remontée de nappes. Dans le cadre de cette recherche, nous proposons alors d'offrir aux gestionnaires du risque des cartographies préventives sur l'aléa « crues rapides », et ce à deux niveaux d'observation. Une première spatialisation des zones à risque à une échelle régionale a été réalisée en confrontant la localisation des bassins versants sensibles à l'aléa aux foyers de population. Cette approche exploratoire permet de voir que le risque est élevé dans certaines vallées du fait de la forte pression foncière. En croisant l'efficacité structurelle interne des bassins versants, mesurée par l'automate cellulaire RuiCells, à la distribution spatiale des zones bâties aux échelles fines, il est possible d'affiner le diagnostic régional en passant à une échelle « intra-bassin ». Les cartes proposées sur quelques bassins versants paraissent conformes à notre connaissance du terrain et aux dires des experts locaux. Ces essais cartographiques donnent des résultats encourageants qui pourraient, à court terme, améliorer la prise en compte de ce risque encore mal connu et sous-estimé dans ces régions.

KEY WORDS

Flash floods
Risk
Paris Basin
Morphology
Preventive maps

ABSTRACT

Preventive mapping of risk linked to the flash floods in the north of France

This article aims to better assess the risk due to flash floods occurring at the end of the spring or during summer in the north of the Parisian Basin. Most of the hydrological studies focused in this area on classical floods as overflowing and water table rising but not on floods rarely occurring in dry valleys. Based on sensitive and relevant parameters observed at two various scales, such approach might address to the stakeholders and to the risk managements a few preventive maps. The mapping firstly defines the flash floods risk at a regional scale comparing urban densities and the spatial distribution of sensitive watersheds to hazard. The latter are identified according to morphological characteristics. This exploratory approach permits us to detect high degree of risk in several bottom valleys due to the strong land lobby. Another mapping is secondly defined at local scales. Influence of the structural efficiency of a catchment is combined with the distribution of houses within the studied watershed. Our knowledge on exposed areas and those of local expert advices validate results. So, this approach gives satisfying results and should be used to anticipate exposed urban areas.

1. Introduction

Les politiques de prévention menées pour limiter les effets liés aux inondations axent aujourd'hui en France leurs objectifs sur l'information, la communication et/ou la sensibilisation (Chardon et Thouret, 1994 ; Pottier, 1998 ; Ledoux, 2006 ; MRN, 2009). La cartographie de l'aléa, établie en tenant compte de l'ampleur et de la période de retour du phénomène, est devenue l'un des éléments indispensables pour la réalisation du Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI). Ces documents sont annexés au PLU (Plan Local d'Urbanisme) ou au POS (Plan d'Occupation des Sols) et valent, à ce titre, « servitude d'utilité publique ». Des inondations répétées dans le temps et dans l'espace amènent à la prévention d'un événement du même type et, par conséquent, à la cartographie de ce risque dans la perspective de protéger des biens et des personnes (Veyret-Mekdjian, 2001 ; Vinet, 2003 ; Moriniaux, 2004). Cette spatialisation de l'aléa, des zones inondées ou de celles potentiellement vulnérables, est nécessaire pour l'application des documents réglementaires (Garry, 1995 ; Bocco *et al.*, 2001). Néanmoins, les travaux réalisés jusqu'à présent dans les régions du nord de la France se sont focalisées sur les inondations classiques (par débordement ou par remontées de nappe) ou sur les coulées boueuses hivernales (Topin, 2000 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002). Très peu d'études ont finalement été proposées sur les « crues rapides » printanières et estivales. À l'inverse, ces phénomènes sont plus étudiés et mieux connus sur le pourtour méditerranéen (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005 ; MEEDAD, 2006 ; Heydt et Ortega, 2009).

Dans cet article, on souhaite proposer des solutions aux gestionnaires du risque et aux acteurs locaux tout en identifiant les secteurs potentiellement les plus vulnérables aux « crues rapides » dans les régions du nord de la France. S'il reste encore peu étudié, le risque lié à ces inondations apparaissant au cours de la période mai-août constitue une réelle préoccupation dans ces régions de plateaux (Delahaye, 2002 ; Douvinet, 2008). À cause de leur nature sub-torrentielle, ces phénomènes constituent la forme la plus dangereuse des inondations rencontrées dans ces régions. Ces crues turbides et violentes apparaissent suite à des pluies de forte intensité (supérieures à 50 mm en quelques heures seulement) et elles se manifestent dans des petits bassins versants (> 40 km²) dont l'une des particularités est de ne pas présenter d'écoulement pérenne, ce que l'on appelle des « vallons secs ». De manière schématique (figure 1), les ruissellements diffus sont rapidement concentrés et ils alimentent les talwegs de ces vallons secs pour former une véritable « crue rapide », avec un mur d'eau (ou « vague de boue ») qui peut dépasser un mètre de hauteur. Les ruissellements sont suffisamment énergiques pour engendrer des incisions majeures sur de très courtes distances. Une ravine de 9 m de profondeur et 8 m de largeur s'est ainsi formée en quelques dizaines de mètres lors de la crue du 9 mai 2000 sur le bassin des Quatre Vaux. Lorsque les exutoires des « vallons secs » sont urbanisés, les dégâts sont systématiquement importants, pouvant atteindre une ampleur dramatique comme lors des crues du 16 juin 1997 en Seine-Maritime avec 4 personnes décédées (St-Martin-de-Boscherville, Barentin) ou 2 victimes suite aux crues du 9-10 mai 2000 (Barentin et St-Léonard).

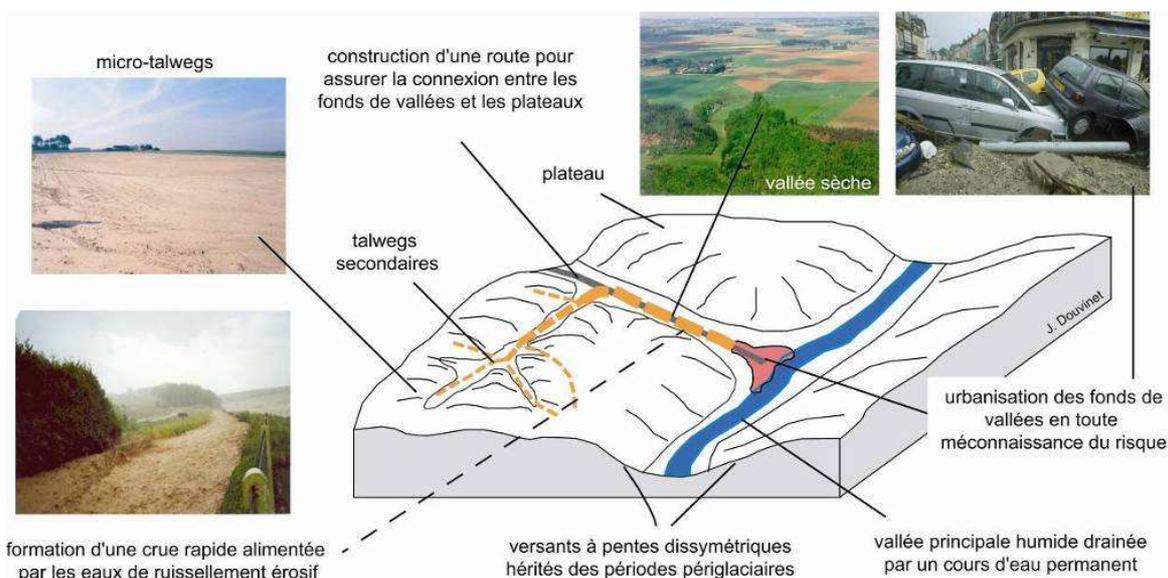


Figure 1. Fonctionnement schématique d'une « crue rapide » dans le nord de la France

Il est d'autant plus urgent de proposer des stratégies pour améliorer la prévention face à ce type de « crues rapides » que ces catastrophes hydrologiques sont à la source d'un risque torrentiel élevé (mais inconnu !) aux exutoires urbanisés de nombreux bassins. La démarche retenue ici repose sur une approche à deux niveaux : 1) une étude centrée sur l'aléa à une échelle régionale, en croisant la localisation des bassins sensibles d'un point de vue morphométrique aux foyers de population ; 2) une analyse, aux échelles fines, de la distribution des zones bâties par rapport à l'efficacité structurelle interne des bassins versants. Cette approche combine des méthodes permettant d'identifier des propriétés géographiques singulières (SIG) à des outils d'analyse spatiale plus récents tels que les Automates Cellulaires (Abler *et al.*, 1971 ; Pumain et Saint-Julien, 1997 ; Sanders, 2001). Ces essais cartographiques doivent favoriser la mise en place d'un système préventif à court terme.

2. Présentation du site d'étude et données associées

Un inventaire des « crues rapides » du nord de la France avait été effectué sur huit départements (Douvinet, 2006) : Calvados, Eure, Seine Maritime, Oise, Somme, Nord, Pas-de-Calais et Aisne. Réalisé de 1983 à 2005 et sur la période mai-août inclus (période que l'on considère comme étant la plus propice aux orages violents), cet état des lieux a permis d'identifier 189 bassins touchés par 269 événements. En moyenne, 8 à 9 événements sont donc recensés tous les ans, ce qui atteste de la réalité du risque « crues rapides » quand on se place à une

échelle régionale. On observe aussi que 68 % des bassins ont été touchés une seule fois en 23 ans, ce qui confirme cette fois-ci que, localement, ces crues se produisent rarement aux mêmes endroits (Angeliaume *et al.*, 1994 ; Meyer, 2001 ; Delahaye, 2002).

L'analyse du facteur de déclenchement (la pluie) et de deux facteurs de prédisposition (l'occupation du sol et la morphologie des bassins) a permis de mettre en évidence l'importance d'un contrôle morphologique majeur (Douvinet, 2008). L'étude des caractéristiques morphométriques des 189 bassins versants recensés (1983-2005) montre que deux portraits types se dégagent en tenant compte de l'ordination des bassins par rapport aux grands organismes fluviaux, de leur degré d'encaissement et de leur position par rapport aux éléments structuraux. Un premier type (appelé type 1) regroupe 178 entités (94 % de l'échantillon). Ce sont des petits vallons (< 25 km²), situés en aval de plus grands bassins (> 50 km²), caractérisés par un saut d'ordre dans la classification de Strahler et présentant un encaissement marqué. Deux sous types sont distingués au sein de ce premier portrait type, avec un type 1.1 déjà observé dans le Pays de Caux (Delahaye, 2002) et un type 1.2 qui rassemble des bassins liés à des particularités morpho-structurales (plateaux à corniche, cuestas, boutonnières). Un second type (appelé type 2) regroupe seulement 11 bassins, soit 6 % de l'échantillon. Ces bassins sont de plus grande taille (25-80 km²) ; ils se situent dans les parties amont de grands bassins et les pentes y sont moins prononcées (figure 2) à cause d'un encaissement plus régulier. Ces bassins sont plus « matures » au sens défini par R. Coque (1998).

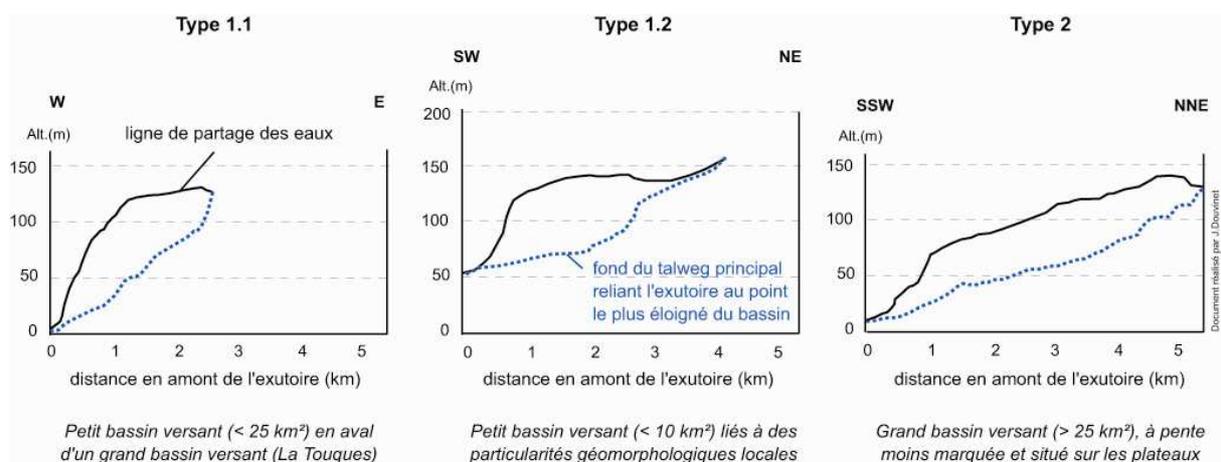


Figure 2. Mise à jour de deux portraits types morphologiques sur les 189 bassins étudiés

L'influence de la variable morphologique est observée à l'échelle des grandes formes mais aussi à l'échelle interne des bassins versants puisque la vitesse de concentration des écoulements rapides est liée à la combinaison entre le système de pentes, l'organisation des réseaux de talwegs et la forme des bassins. Il est alors important de bien conserver ces deux niveaux d'observation. Les cartes proposées à l'échelon régional seront progressivement affinées par des diagnostics réalisés à des échelles bien plus fines.

3. Une première spatialisation du risque à l'échelle régionale

3.1. Méthode et données utilisées

Suivant la répartition du relief et la structure géologique sous-jacente, il existe un stock de bassins présentant des critères morphométriques communs. Les deux types, l'un lié à la morphologie (type 1), l'autre à des formes très spécifiques (type 2), coexistent dans ces régions et pourtant, leur distribution spatiale est différente (figure 4).

En se focalisant sur les bassins du type 1 pour des raisons essentiellement stratégiques (type majoritaire et plus facile à détecter), on aboutit à une première cartographie des espaces potentiellement sensibles à l'aléa. On s'intéresse plus spécialement aux vallons qui répondent aux trois critères suivants : ils se situent en aval de grands bassins, ils présentent une dénivellée importante (> 50 m) et sont caractérisés par un saut

de plus de deux ordres ; les versants encadrant le fond du talweg principal ont des pentes supérieures à 10 %. Ces critères somme toute assez généraux ont été obtenus suite à une étude des relations bi-variées entre plusieurs indices morphométriques.

La localisation de ces bassins où l'occurrence de l'aléa « crue rapide » est probable a ensuite été croisée à la distribution spatiale des espaces urbanisés pour obtenir un « niveau de risque final », associant l'aléa aux enjeux potentiellement touchés. On distinguera les exutoires peu urbanisés (moins de 20 bâtiments) et les exutoires plus « densément peuplés », où les maisons sont implantées dans tout le fond du vallon et où l'exposition est élevée. Ce seuil de 20 maisons a été fixé de manière arbitraire : c'est un premier « seuil-test ». L'objectif ici n'est pas de quantifier le coût des dégâts potentiels (Puissant *et al.*, 2005 ; Beck *et al.*, 2007 ; Propeck-Zimmermann *et al.*, 2007), mais plutôt de spatialiser les exutoires les plus exposés à l'occurrence probable de ce type de phénomène.

Cette démarche est illustrée sur deux vallées localisées en Seine-Maritime (figure 3). La sensibilité apparaît de manière très différente : la basse vallée de la Rançon est faiblement urbanisée, à l'exception du petit vallon de Fontenelle où s'est développée la commune de Wandrille-Rançon. Par opposition, la partie aval de la vallée de l'Austreberthe est très exposée : le tissu urbain est dense et continu entre Duclair et Barentin et certains vallons (Villers-Ecalles, St-Paer) ont d'ailleurs déjà fonctionné au cours de la période 1983-2005.

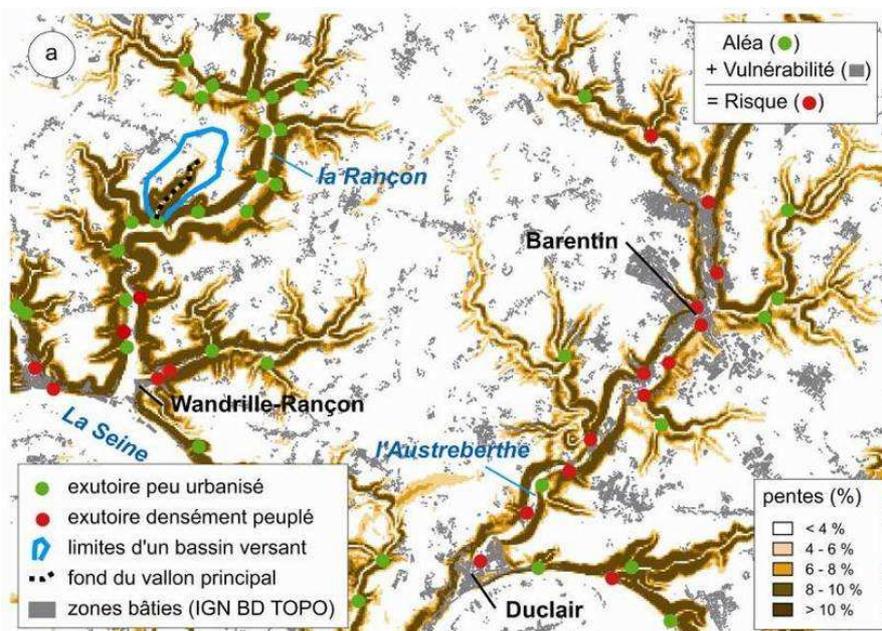


Figure 3. Croisement entre vallons potentiellement sensibles à l'aléa et degré d'urbanisation

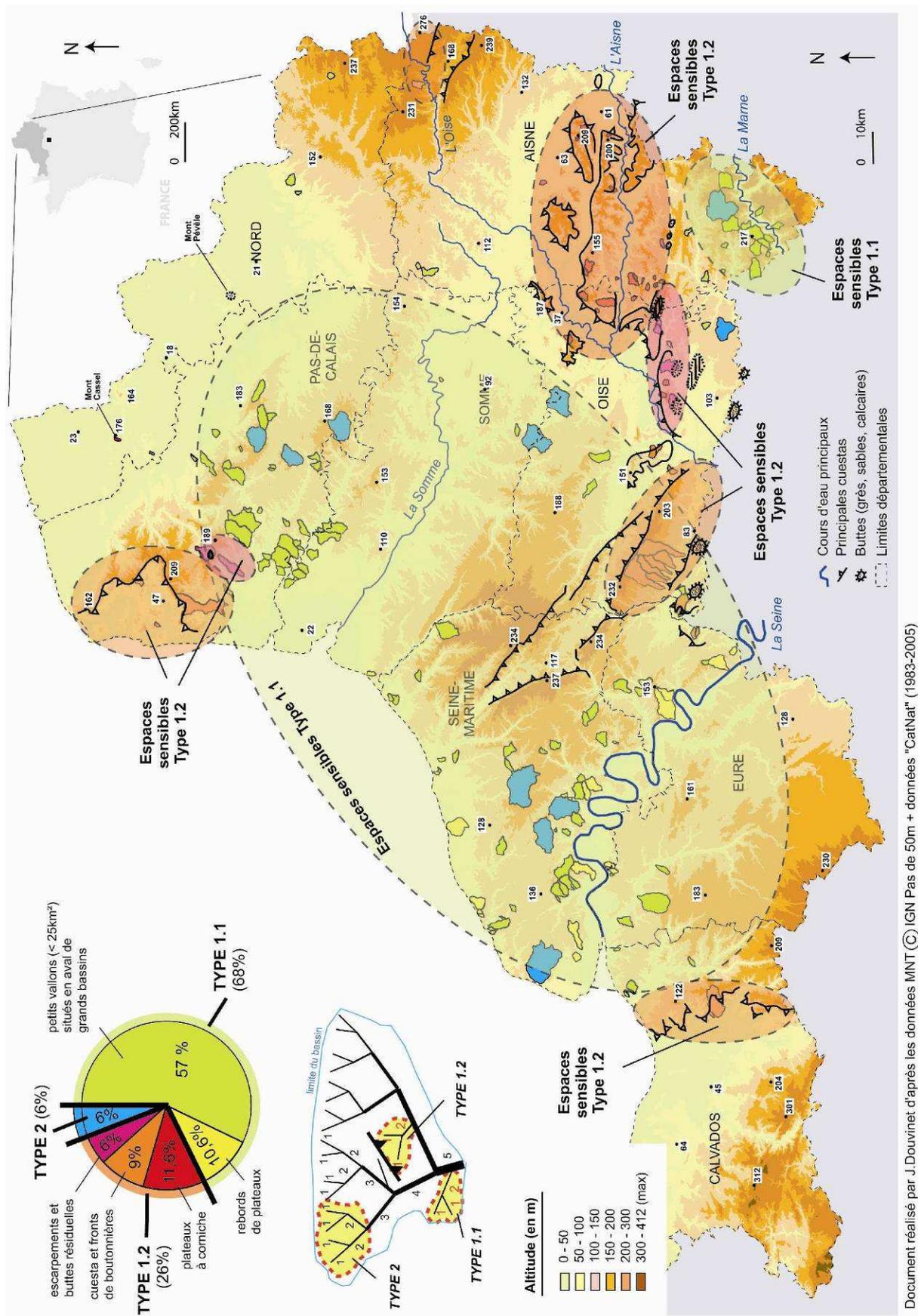


Figure 4. Importance du contrôle morphologique régional, avec deux portraits types morphologiques qui définissent une première zonation spatiale du risque « crues rapides » dans le nord de la France

3.2. Résultats

La carte du risque réalisée à l'échelle régionale (figure 5) permet d'identifier 2 540 exutoires de vallons qui ont des caractéristiques communes avec le type 1, tel que défini précédemment. 167 vallons correspondent à des bassins versants recensés lors du premier inventaire (1983-2005). On retrouve 94 % de l'échantillon initial. La carte confirme la sensibilité de certains secteurs géographiques (Pays de Caux, Haut-Pays d'Artois, Soissonnais), déjà identifiés auparavant, mais elle met aussi à jour la prédisposition d'autres secteurs, tels que le Pays d'Auge ou la Thiérarchie. Cette cartographie régionale démontre une concentration des vallons sensibles à l'aléa le long des principales vallées humides et le long des plateaux à corniche. La densité des exutoires augmente fortement lorsque l'encaissement devient marqué dans le paysage, tandis qu'elle diminue dans les vallées qui se raccordent avec les niveaux de base de manière plus régulière (bassin versant de la Somme). Ces résultats confortent encore un peu plus ceux obtenus lors du premier inventaire effectué à partir des dossiers « *CatNat* » (Douvinet, 2006).

Sur les 2540 exutoires, 902 sont « densément peuplés » (rappelons que le seuil de 20 maisons a été fixé de manière arbitraire), ce qui représente 35 % de l'échantillon. Le risque apparaît élevé dans les parties aval de certaines vallées comme la Durdent, la Scie ou l'Arques (figure 5). Le manque de place, l'inconstructibilité des secteurs inondables dans les basses vallées, le maintien des terres agricoles sur les plateaux, ou la présence de forêts domaniales, peuvent expliquer la très forte pression foncière qui s'exerce sur les espaces environnants, et en particulier dans les talwegs des « vallons secs » (Angeliaume, 1996 ; IGE, 2001 ; Meyer, 2001 ; Auzet *et al.*, 2005). D'autres vallées présentent un nombre important de vallons sujets à l'aléa mais elles restent finalement peu urbanisées (Pays d'Auge). L'exposition au risque « crues rapides » est alors faible dans ces espaces.

À la lecture de ces résultats, un « niveau de risque final » est proposé en croisant la densité des vallons potentiellement sujets à des « crues rapides » à la densité des vallons les plus « densément peuplés » sur la figure 6. Le calcul des densités prend en compte la distance euclidienne, et non l'alignement des vallons au sein des vallées. Une forte sensibilité à l'aléa génère un risque élevé lorsque les espaces urbanisés sont importants, mais seulement un risque faible si l'habitat est peu présent. On peut ainsi décomposer ce « niveau de risque final » en quatre catégories :

- risque très faible (Baie de la Somme, Santerre, Plateau Picard, Lieuvin) ;

- risque faible : forte sensibilité à l'aléa mais faible exposition des enjeux (Pays d'Auge, Soissonnais) ;

- risque moyen : faible sensibilité à l'aléa mais forte vulnérabilité (Vexin normand, Noyonnais) ;

- risque élevé : aléa important associé à une forte exposition des enjeux.

Quatre secteurs paraissent particulièrement sensibles sur la figure 6 : Lillebonne, Dieppe, Montreuil-Hesdin et Sissonne. Etant donné la proximité spatiale entre ces bassins à risque, on comprend mieux pourquoi plusieurs crues ont été recensées dans ces espaces au cours d'un même épisode pluvieux. C'est alors dans ces secteurs que les politiques de prévention et d'information menées à une échelle régionale doivent accèder leur priorité. Parmi les 902 exutoires urbanisés, on retrouve par ailleurs 146 bassins recensés au cours de la période 1983-2005, ce qui représente 86 % de l'échantillon des bassins faisant partie du type 1. Le seuil fixé à 20 bâtiments était un premier « seuil-test ». À moyen terme, il serait intéressant de faire varier ce seuil pour suivre l'évolution du ratio entre le nombre de vallons urbanisés et le nombre de bassins touchés. Les exutoires des bassins restants (13 %) sont plus faiblement urbanisés (moins de 20 maisons) ; la plupart des dommages ayant été notés à l'intérieur de ces bassins, la seconde approche proposée, à savoir un diagnostic du risque à des échelles beaucoup plus fines, paraît indispensable.

4. Améliorer la spatialisation du risque en passant à une échelle « intra-bassin »

4.1. Méthode et données utilisées

Dans un deuxième temps, les secteurs sensibles ont été étudiés à l'intérieur des bassins versants (soit à une échelle « intra-bassin »). La morphologie joue encore un rôle prépondérant à ce niveau d'observation puisque la vitesse de concentration des crues, principalement alimentées par des écoulements de surface, est dépendante de cette relation entre la forme d'un bassin, l'organisation de son réseau de talwegs et son système de pentes comme l'on montré les travaux d'E. Hauchard (2001), D. Delahaye (2002) et D. Delahaye *et al.*, (2007). En s'appuyant sur l'automate cellulaire *RuiCells* (Langlois et Delahaye, 2002), dont une courte présentation est rappelée dans l'encadré 1, des outils de mesures ont été développés pour traduire les effets de l'état géomorphologique des

bassins sur leur dynamique hydrologique et pour évaluer leur efficacité structurelle en trois dimensions. Cette approche permet de détecter des comportements hydrologiques originaux (Douvinet *et al.*, 2008). Classiquement, dans les systèmes hortonien, la réponse hydrologique s'établit de telle sorte qu'à l'exutoire, on cumule les contributions relativement proches des sous bassins, ce qui traduit

une forte homothétie interne. En revanche, les simulations proposées sur d'autres bassins ont permis de voir d'autres signatures atypiques (efficacité structurelle interne, déperdition d'énergie), liées au jeu intrinsèque entre concentration des surfaces et organisation des réseaux (Douvinet *et al.*, 2008).

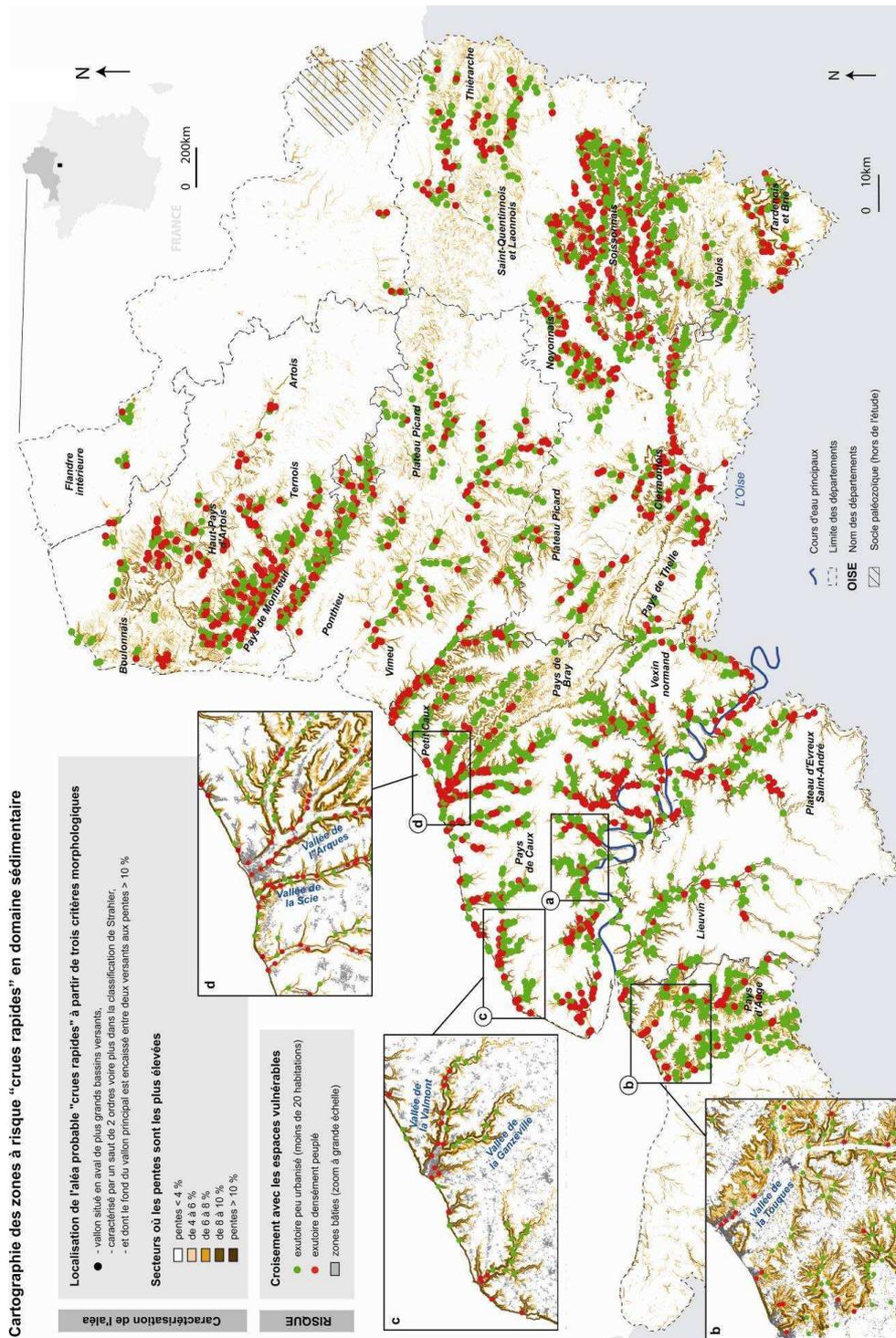
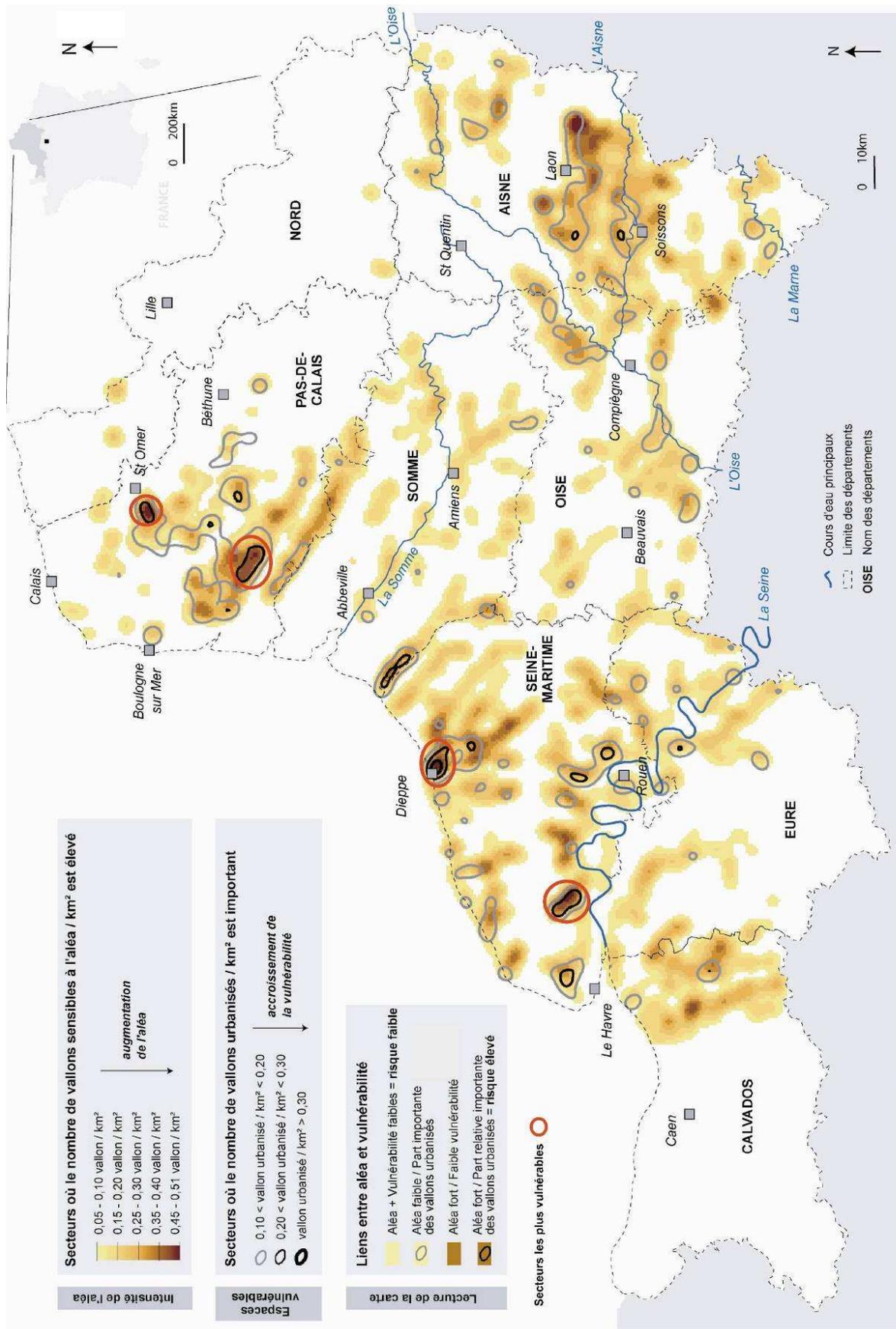


Figure 5. Cartographie de 2 540 exutoires de vallons aux caractéristiques communes au TYPE 1 et mise en évidence de leur degré d'urbanisation avec un seuil fixé à 20 maisons

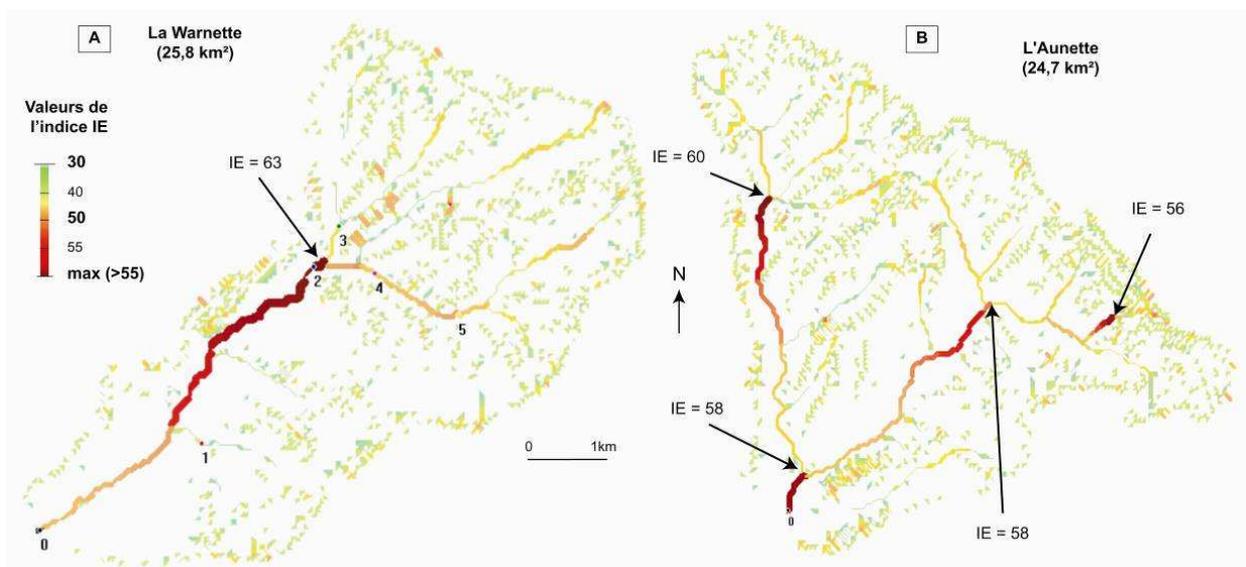


Encadré 1. Présentation simplifiée de l'automate cellulaire RuiCells (extrait de Douvinet et al., 2008)

L'automate cellulaire RuiCells a été conçu et développé pour simuler l'influence des composantes morphologiques sur la formation des écoulements surfaciques. Le concept classique d'Automate Cellulaire, tel que S. Wolfram (2002) l'a défini, a été généralisé pour pouvoir modéliser à la fois la structure variable des éléments de terrain et la connectique entre les cellules (Langlois et Delahaye, 2002). Les liens d'écoulements ne sont plus seulement guidés, de manière uniforme, par la topologie de voisinage du réseau cellulaire, mais par les liens structurant la surface. La démarche s'appuie sur un AC 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. La principale difficulté était de relier certaines variables topographiques (l'altitude et ses dérivées) aux variables hydrauliques tels que la direction des écoulements sur le maillage triangulaire. Se pose alors le problème de savoir si cet automate peut être considéré comme un AC. Modifié pour répondre à une problématique géographique, nous considérons que RuiCells fait partie de la catégorie des Automates Cellulaires Géographiques (ACG car il répond toujours à des règles de l'AC classique (Ménard et Marceau, 2006). Par ailleurs, l'automate cellulaire RuiCells provoque la transition des surfaces de cellule en cellule via les axes de circulation qui s'auto-organisent en fonction de la morphologie du terrain, en suivant le même principe que pour un écoulement. À chaque itération, les cellules se vidangent dans celles qui sont connectées en aval et reçoivent les surfaces venant de celles situées en amont. Les entrées et les sorties sont comptabilisées pour chaque cellule en mode synchrone. Le processus itératif est discret et les itérations dépendent de la résolution du MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui définit la taille du maillage (pas de 50 m utilisé dans ce cas présent). Dans le cas présent, les simulations prennent uniquement en compte les surfaces qui se cumulent au fur et à mesure des itérations. Des indices ont été proposés à partir des graphiques et des simulations numériques. Les points de mesure, choisis par l'utilisateur, permettent de lancer les simulations en tout point de l'espace et sur n'importe quel type de cellule.

Suite à ces premières observations, nous avons cherché à détecter les zones à forte concentration d'énergie pouvant expliquer la réactivité d'un bassin (Douvinet, 2010). Divers indices morphosynthétiques ont été proposés, notamment un indice IE (Indice d'Efficacité structurale) qui permet de détecter toutes les confluences en amont desquelles le réseau de talwegs est structurellement bien organisé. Dans certains bassins, cette efficacité est nulle puisqu'il n'y a pas de zones privilégiées présentant une très forte concentration. En revanche, sur d'autres bassins, l'efficacité structurale est forte et peut se manifester par une efficacité structurale interne (figure 7a) ou par une homothétie interne (figure 7b), l'efficacité observée à l'échelle du / des sous bassin(s) se retrouvant ainsi à l'exutoire final du bassin versant (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Cudennec, 2000).

Cette seconde analyse permet de quantifier la réponse hydrologique potentielle des bassins en tout point de l'espace et de mettre en évidence les zones fonctionnelles d'un point de vue morphologique. On propose ensuite de comparer cette information avec la localisation des zones bâties localisées à partir de la BD TOPO® IGN 1999 pour identifier des espaces « à risque » à cette échelle « intra-bassin ». Les simulations numériques proposées à partir de l'automate doivent permettre de mesurer le degré d'exposition des zones bâties face à un potentiel de concentration théorique des écoulements de surface. La démarche devra être validée sur des bassins où les dégâts ont été localisés avec précisions avant de pouvoir être extrapolée à d'autres bassins versants qui ont une forte sensibilité mais qui n'ont pourtant pas été recensés dans l'inventaire initial (1983-2005).



4.2. Résultats

Dans un premier temps, l'étude porte donc sur des bassins où une cartographie détaillée des dommages était disponible. L'objectif ici est de confronter ces cartes avec l'efficacité structurelle interne des bassins de façon à tester la corrélation entre la localisation des principaux sinistres et le potentiel de concentration des écoulements de surface. Une première analyse a été menée sur le bassin de St-Martin-de-Boscherville (figure 8). Rapidement et ce, de manière assez surprenante, on observe que les cellules où les valeurs de l'indice IE sont les plus élevées correspondent exactement à la même zone que celle qui a été la plus touchée lors de la « crue rapide » du 16 juin 1997. Dans

la réalité, la section située entre les points 2 et 3 (soit là où les indices sont supérieurs à 50) a été entièrement détruite : route incisée sur une longueur de 300 mètres avec une profondeur parfois supérieure à 2 mètres, voitures emportées, matériaux charriés, etc. La carte de l'indice IE semble donc bien corrélée avec la localisation des dommages les plus importants. Les espaces urbanisés sont directement exposés à cette efficacité structurelle (figure 8c) : plusieurs maisons sont localisées à proximité de points où les indices IE sont très élevés. Lors de la crue du 16 juin 1997, l'arrivée d'une véritable « vague de boue » a été observée dans la partie amont (figure 8a), ce qui a entraîné des dégâts matériels onéreux (plus de 5 M €) et des pertes en vie humaines puisque 3 personnes ont été emportées dans le vallon de l'Ouraille (figure 8b).

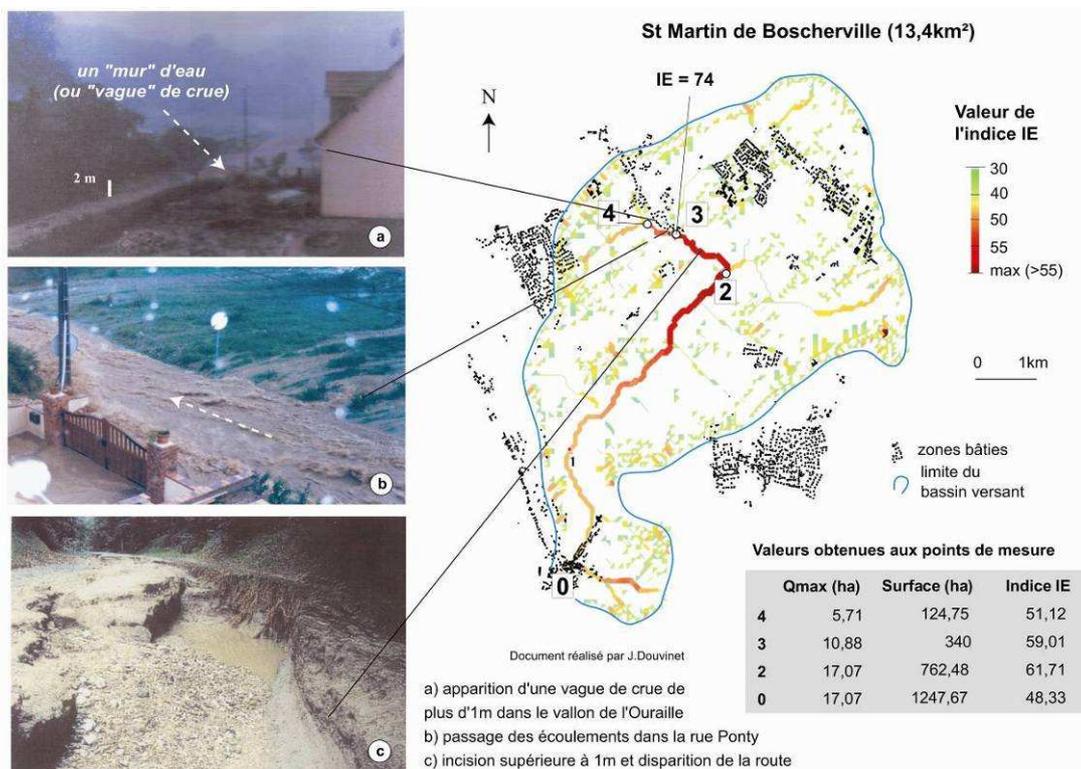


Figure 8. Liens entre l'indice IE, les zones bâties et les secteurs sinistrés sur St-Martin-de-Boscherville

Une deuxième étude a été effectuée sur le vallon d'Hautot-sur-Mer touché par une « crue rapide » le 28 juin 2005 (figure 9). Dressées par nos soins au lendemain de l'événement, les cartographies des dégâts matériels et des impacts morphodynamiques montrent que l'incision majeure sur la Cavée d'Hautot (figure 9a) ressort très nettement car c'est à cet endroit que l'indice (IE = 61) est le plus élevé. Les autres points élevés (> 50) indiquent également une concentration énergétique des écoulements. Or, les incisions y sont moins marquées car les surfaces enherbées ont joué un rôle protecteur face à la capacité érosive des écoulements. Dans la partie aval de ce vallon (2,1 km²), la route a servi de relais entre le potentiel de concentration des ruissellements (confluence) et l'exutoire (zones bâties).

Ces deux exemples montrent que la localisation des indices IE les plus élevés concorde avec la distribution spatiale des incisions morphogéniques les plus importantes. Cette approche semble suffisamment pertinente pour servir de support cartographique à la spatialisation des zones à risque aux échelles fines. En effet, en croisant les cartes des indices IE avec les zones bâties, il devient possible d'identifier les secteurs potentiellement exposés à une concentration rapide et violente des écoulements. Cette analyse doit évidemment être complétée en intégrant d'autres enjeux (Pelling, 2003 ; Moriniaux, 2004 ; Jousseume *et al.*, 2004 ; Puissant *et al.*, 2005), qu'ils soient structurels (réseaux routiers ou infrastructures) ou non (les profils socio-économiques des personnes

vulnérables ou la mobilité des populations en période de crise). L'aléa doit aussi être quantifié de manière plus précise, mais l'absence de données hydrométriques pose - et posera toujours - des problèmes pour évaluer la récurrence de ces crues qui apparaissent dans des « vallons secs ». Bien que reposant sur des données simples, les cartes de l'indice IE constituent finalement un bon outil d'investigation. Cette démarche a dès lors été testée sur d'autres bassins non recensés comme « touchés » dans le cadre de notre premier inventaire dressé pour la période 1983-2005.

La région de Dieppe a été choisie comme site d'exploration. Ce choix se justifie par la volonté de travailler dans un secteur qui apparaît comme très vulnérable à une échelle régionale (figure 6) et par le fait que plusieurs bassins « non touchés » se situent à proximité de bassins récemment touchés. Plusieurs types de configurations sont possibles (figure 9) : de nombreux vallons se raccordent dans les vallées humides sur de courtes distances ; des petits bassins côtiers, se jetant dans la Manche, présentent également

un encaissement marqué. Deux indices IE élevés, indiquant une efficacité structurelle prononcée, ressortent sur deux bassins qui n'ont pas été recensés lors de l'inventaire initial. Sur le vallon du Petit Ailly, situé près du littoral, l'efficacité est très marquée avec un indice IE de 73 qui équivaut à celui mesuré dans la partie amont de St-Martin-de-Boscherville. Le risque est toutefois inexistant car aucune habitation n'a été construite dans le fond du talweg du « vallon sec ». Seule la route peut potentiellement présenter des dommages structurels. Sur un autre bassin (le vallon des Fontaines), qui est localisé en rive droite de la Scie, le risque est plus élevé et la commune de Petit-Apperville, touchée lors de la crue du 28 juin 2005 (figure 8), se retrouve d'ailleurs 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 ainsi l'existence de confluences où les écoulements peuvent ponctuellement devenir importants, voire violents, sur d'autres entités hydrologiques. Ces espaces sont, dès lors, potentiellement « sensibles » en cas de pluies de forte intensité.

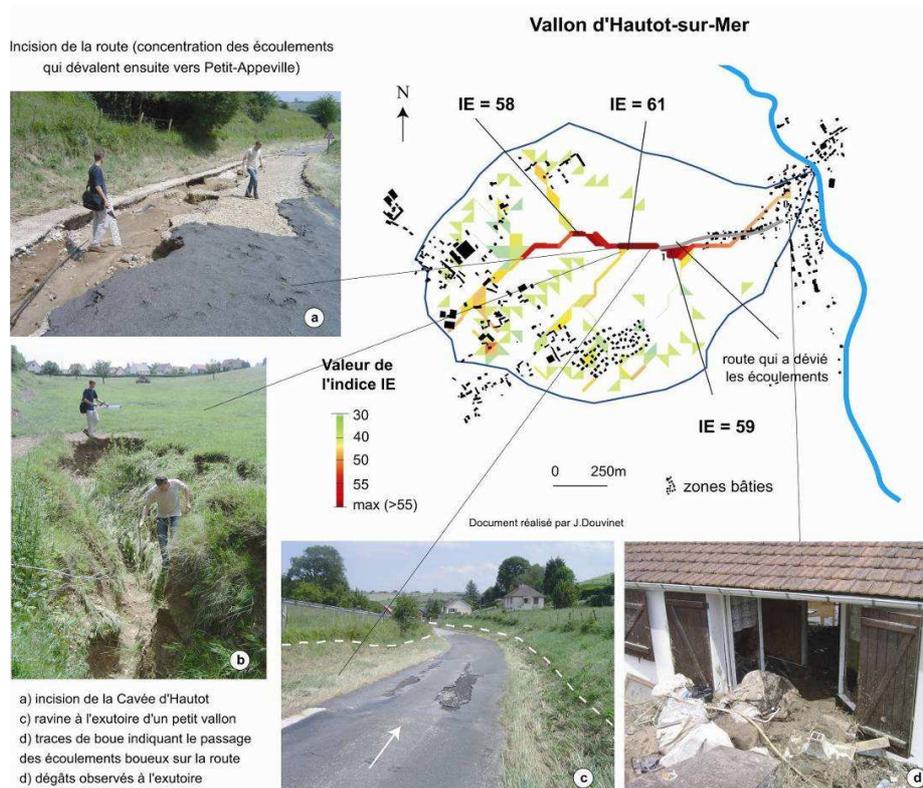


Figure 9. Liens entre l'indice IE, les zones bâties et les secteurs sinistrés sur Hautot-sur-Mer

Ces « diagnostics » du risque proposés aux échelles fines ouvrent plusieurs perspectives. Ils pourraient être utilisés par les gestionnaires pour cibler les secteurs sensibles et fonctionnels d'un point de vue morphologique. On se place ici dans le champ de la cartographie préventive : l'analyse d'événements probables et la construction de scénarii doit permettre la mise en place

des plans de gestion de crise et d'anticipation (Provitolo, 2007). Par ailleurs, il serait possible de délimiter les surfaces en amont desquelles des aménagements (bassins de rétention, diguettes, mares) pourraient être préconisés pour atténuer leur efficacité hydrologique. Les simulations, prenant en compte (ou non) les aménagements proposés, serviraient alors

d'outils de gestion et de discussion auprès des acteurs locaux (Souchère *et al.*, 2005 ; Beck *et al.*, 2007 ; Gaillard *et al.*, 2008). La représentation cartographique en tout point de l'espace de la concentration des eaux de surface devrait également permettre de gérer, voire de diminuer, l'exposition des personnes en temps de crise. La mobilité est le principal facteur de risque commun à tous les phénomènes de « crues rapides » (Antoine *et al.*, 2001 ; Ruin *et al.*, 2007 ; Ortega et Heydt, 2009).

Un rapprochement entre *RuiCells* et un SMA (Système Multi-Agent) est, à ce titre, envisagé : les agents seraient des véhicules en déplacement, avec des destinations prédéfinies (trajets domicile-travail, crèche-domicile, etc), et ils seraient exposés aux écoulements simulés pour une certaine intensité de pluie et sur un bassin donné. Cette idée, au stade exploratoire pour le moment, permettrait d'intégrer de la dynamique dans les approches de risque.

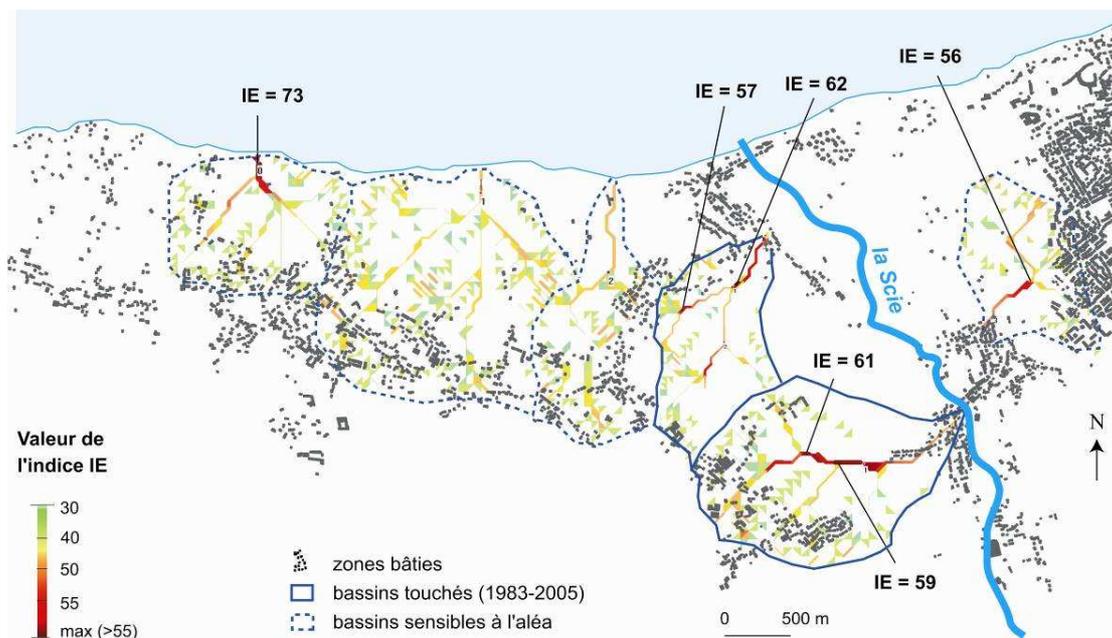


Figure 10. Cartographie des indices IE et des zones bâties dans des bassins versants « touchés » par des « crues rapides » (1983-2005) et dans des entités non touchées

5. Conclusions

Rappelons d'abord les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude. L'échelon régional fournit une vue d'ensemble de la distribution des vallons vulnérables au risque lié aux « crues rapides » en se basant sur les caractéristiques morphologiques prépondérantes (type 1) et sur la localisation des foyers de populations. Sur les 2 540 exutoires de vallons potentiellement sujets à l'aléa, 902 présentent une forte urbanisation, soit 35 % du stock initial. La carte confirme surtout la prédisposition de régions déjà mises en avant par l'inventaire initial : le Pays de Caux, l'Artois, 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 Soissonnais. En choisissant d'identifier les exutoires et non les entités « bassin versant », on s'affranchit de la taille des surfaces amont. Ces expérimentations méritent d'être poursuivies à moyen terme.

À l'échelle « intra-bassin », les indices IE permettent d'identifier les points à forte concentration d'énergie, soit là où les écoulements de surface peuvent se concentrer de manière rapide et violente. Ces indices sont bien corrélés avec les zones où les sinistres ont été importants et 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 « 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. En parallèle, ces indices spatialisent des zones à risque quand les zones urbanisées sont directement exposées à l'aléa. La plupart des zones où les indices IE sont élevés sont par chance dépourvues de toute urbanisation. Ainsi, l'aléa existe, mais les sinistres affectant principalement les infrastructures ne sont pas considérés comme « dommageables » pour les populations (Pigeon, 2002).

Deux perspectives sont envisageables à court et à moyen terme. À court terme, cette approche mérite d'être poursuivie sur d'autres vallons et confrontée à d'autres retours d'expérience. Il faudrait ensuite ajouter d'autres paramètres physiques et/ou 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. De façon conjointe, les simulations offrent la possibilité de combiner le comportement hydrologique

potentiel d'un bassin versant (aléa théorique) à la localisation des surfaces urbanisées (enjeux) dans n'importe quels espaces. À moyen terme, cette démarche est 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 (Gaume *et al.*, 2000 ; Antoine *et al.*, 2001 ; Lahousse *et al.*, 2003 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005).

6. Références bibliographiques

- Abler R., Adams J., Gould P., 1971, *Spatial organization: the geographer's view of the world*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Angeliaume A., 1996, Ruissellement, érosion et qualité des eaux en terre de grande culture ; étude comparée de deux bassins versants du Laonnois et du Soissonnais, Thèse de doctorat, Université de Lille 1.
- 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), 107-122.
- Antoine J.-M., Desailly D., Gazelle F., 2001, Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes, *Annales de Géographie*, 622, 597-623.
- Arnaud-Fassetta G., Cosssart E., Fort M., 2005, Hydrogéomorphologic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Gill catchment (Queyras, French Alps), *Geomorphology*, 66, 41-67.
- 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.
- Beck E., Weber C., Granet M., 2007, Identification des effets dominos suite à un séisme ; Application à l'agglomération de Mulhouse, in Foltête J.-C. (dir.), *Actes des Huitièmes Rencontres de Théo Quant*.
- 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), 211-219.
- Chardon A. C., Thouret J.-C., 1994, Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manizales, *Mappemonde*, 4, 37-40.
- Coque R., 1998, *Géomorphologie*, A. Colin, Paris.
- 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.
- Delahaye D., 2002, Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie - modélisation et approche multiscale des risques, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen.
- Delahaye D., Douvinet J., Langlois P., 2007, Le bassin versant : de l'unité spatiale aux sous unités fonctionnelles, Actes du Colloque de Cerisy « Systèmes complexes en SHS », Cerisy, 28 mai – 3 juin.
- Douvinet J., 2006, 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), *Noréis*, 201, 17-30.
- Douvinet J., 2008, Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.
- Douvinet J., 2010, Eléments pour une spatialisation du risque « crues rapides » dans le nord de la France, *Mappemonde*, Image du mois.
http://mappemonde.mgm.fr/actualites/douvinet_mois.html
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., 2008, Modélisation de la dynamique spatiale potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle, *Cybergéo*, 412.
<http://www.cybergeo.eu/index16103.html>
- 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, 305-326.
- Garry G., 1995, Auch, Nîmes, Vaison-la-Romaine : retours d'expériences, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 131-145.
- 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).
- 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.
- Heydt J. A., Ortega G. G., 2009, Geomorphological and sedimentological analysis of flash-flood deposits The case of the 1997 Rivillas flood (Spain), *Geomorphology*, 112 (1-2), 1-14.
- IGE (Inspection Générale de l'Environnement), 2001, Inondations et coulées boueuses en Seine-Maritime. Propositions pour un plan d'action, Rapport d'expertise.

- Jousseume V., Landrein J., Mercier D., 2004, La vulnérabilité des homes et des habitations face au risque d'inondation dans le Val nantais (1841-2003), *Norois*, 180, 29-45.
- 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, 189-196.
- Langlois P., Delahaye D., 2002, « Ruicells », automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface, *Revue Internationale de Géomatique*, 12 (4), 461-487.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002, L'érosion hydrique des sols en France, Rapport INRA-IFEN. <http://erosion.orslans.inra.fr/rapport2002>
- Ledoux B., 2006, *La gestion du risque inondation*, Editions Lavoisier, Paris.
- Ménard A., Marceau E., 2006, Simulating the impact of forest management scenarios in an agricultural landscape of southern Quebec, Canada, using a geographical cellular automata, *Landscape and Urban Planning*, 79, 253-265.
- 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, Université de Paris IV, Sorbonne.
- Ministère de l'Environnement, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD), 2006, Mission d'enquête sur les régimes 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'Inspection Générale de l'Environnement (IGE).
- Mission Risques Naturels (MRN), 2009, Evaluation de la contribution des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRI) à la réduction de la vulnérabilité collective et individuelle, Rapport de synthèse.
- Moriniaux V., 2004, *Les risques*, Editions du temps, Nantes.
- Ortega J.E., Heydt G.G., 2009, Geomorphological and sedimentological analysis of flash floodsdeposits. The case of the 1997 Rivillas flood (Spain), *Geomorphology*, 112, 1-14.
- Pelling M., 2003, *The vulnerability of cities : Natural disaster and social resilience*, Earthscan, London.
- Pigeon P., 2002, Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels, *Annales de Géographie*, 111 (627-628), 452-470.
- Pottier N., 1998, L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et la Marne), Thèse de doctorat, ENPC, CERREVE.
- Propeck-Zimmerman E., Saint-Gérard T., Bonnet E., 2007, Probabilités, risques et gestion territoriale : champs d'action des PPRT, *Géocarrefour*, 82/1-2. <http://geocarrefour.revues.org/index1473.html>
- Provitolo D., 2007, La vulnérabilité aux inondations méditerranéennes : une nouvelle démarche géographique, *Annales de géographie*, 23-40.
- Puissant A., Thiery Y., Malet J.-P., Sterlacchini S. Maquaire O., 2005, Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. Comparaison de deux approches spatialisées par SIG, *Revue Internationale de Géomatique*, 15 (2), 227-245.
- Pumain D., Saint-Julien T., 1997, *L'analyse spatiale – Tome 1. Localisations dans l'espace*, A. Colin, Paris.
- Ruin I., Gaillard J.-C., Lutoff C., 2007, How to get there? Assessing motorist' flash flood risk perception on daily itineraries, *Environmental hazards*, 7, 235-244.
- Rodriguez-Iturbe I, Rinaldo A., 1997, *Fractal River Basins, chance and self-organization*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Sanders L. (dir.), 2001, *Les modèles en analyse spatiale*, Hermès-Lavoisier, Paris.
- 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, 229-240.
- 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.
- Veyret-Mekdjian Y., 2001, *Géographie des risques naturels*, Collection la Documentation Française, La Documentation photographique, Paris, 8023.
- Vinet F., 2003, *Crués et inondations dans la France méditerranéenne : les crués torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées orientales, Hérault)*, Editions du Temps, Nantes.
- Wolfram S., 2002, *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc, Champaign.