Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Géographie

Préparée au sein de l'Université de Caen-Normandie

Contribution à la cartographie multirisques de territoires côtiers : approche quantitative des conséquences potentielles et des concomitances hydrologiques (Normandie, France)

Présentée et soutenue par
Kevin GRAFF

Thèse soutenue publiquement le 27 janvier 2020 devant le jury composé de		
Mme Anne PUISSANT	Professeure des universités, UMR LIVE, Université de Strasbourg	Rapporteure
M. Bruno CASTELLE	Directeur de recherche CNRS, UMR EPOC, Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Denis MERCIER	Professeur des universités, Sorbonne Université, UMR LGP	Examinateur
M. Gilles GRANDJEAN	Directeur de programme, BRGM, Orléans	Examinateur
M. Olivier MAQUAIRE	Professeur des universités, UMR LETG-Caen, Université de Caen-Normandie	Directeur de thèse
M. Benoit LAIGNEL	Professeur des universités, UMR M2C-Rouen, Université de Rouen-Normandie	Codirecteur de thèse

Thèse dirigée par Olivier MAQUAIRE, laboratoire LETG Caen et Benoit LAIGNEL, laboratoire M2C Rouen

UNICAEN

ÉCOLE DOCTORALE 556 HSRT

M2C

UMR 6554 CNRS LETG

Sommaire

Sommaire 3

Remerciement 5

Résumé 9

Introduction générale 11

Chapitre 1. Contexte physio-géographique 25

Chapitre 2. Caractérisation des éléments exposés à différentes échelles spatiales 93

Chapitre 3. Quantification et analyse des conséquences potentielles par une approche multiscalaire 139

Chapitre 4. Analyse statistique des concomitances hydrologiques 181

Chapitre 5. Modélisation hydraulique des débordements de cours d'eau liés à des effets de concomitance avec la mer lors des tempêtes 253

Conclusion générale 319

Références bibliographiques 329

Table des figures 357

Liste des tableaux 365

Table des matières 369

Annexes 377

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement de trois années de recherche passées au laboratoire « *Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique –LETG* », site de Caen, UMR CNRS 6554 de l'Université de Caen-Normandie et au laboratoire « *Morphodynamique Continentale et Côtière - M2C* », site de Rouen, UMR CNRS 6143 de l'Université de Rouen-Normandie. Que par ces pages soient exprimées toute ma gratitude et ma reconnaissance envers toutes les personnes ayant apporté soutien et conseil tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier tout d'abord *Olivier Maquaire*, professeur des universités et directeur du laboratoire LETG-Caen GEOPHEN « *Géographie physique et environnement* » pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, d'avoir dirigé cette thèse et de m'avoir formé au monde de la recherche universitaire. Je tiens à le remercier pour sa rigueur et son encadrement exemplaire ainsi qu'au temps considérable qu'il m'a consacré pour que cette thèse puisse se réaliser dans un délai de trois ans. De par son soutien sans faille et sa franchise, il a pu me faire évoluer en terme de rigueur, je lui adresse donc toute ma gratitude pour cela. Je le remercie également pour la confiance accordée ainsi que pour les responsabilités confiées me permettant de représenter notre équipe de recherche au sein de nombreuse réunions du programme ANR RICOCHET.

Ce travail de recherche a été également codirigé par *Benoit Laignel*, professeur des universités au laboratoire M2C-Rouen. Je tiens particulièrement à le remercier pour l'écoute et les conseils qu'il a su m'apporter pour faire progresser et améliorer ce travail de recherche, mais également pour avoir su orienter au mieux les recherches dans un domaine où beaucoup de choses sont encore à explorer.

Je voudrais remercier les deux rapporteurs de ce travail, *Anne Puissant*, professeure des universités au « *Laboratoire Image, Ville, Environnement – LIVE* », UMR CNRS 7362 (Université de Strasbourg), et *Bruno Castelle*, directeur de recherche CNRS au laboratoire « *Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux - EPOC* », UMR CNRS 5805 (Université de Bordeaux), qui me font l'honneur d'accepter la charge de l'évaluation de ce travail. Je remercie également *Gilles Grandjean*, directeur de programme « *Risques naturels et résilience des territoires* » au BRGM d'Orléans et *Denis Mercier*, professeur des universités (Sorbonne Université) au « *Laboratoire de Géographie Physique – LGP* », UMR CNRS 8591 pour avoir accepté d'être les examinateurs de ce travail de thèse.

Je souhaite également remercier le président de la Communauté d'Universités et Établissements (COMUE) Normandie-Université pour m'avoir attribué une allocation doctorale sur ce sujet de recherche. Cette thèse a également bénéficié du soutien financier et scientifique du projet de recherche ANR RICOCHET « *Évaluation multirisques de territoires côtiers en contexte de changement global* » et du projet de recherche RIN RAIV-COT « *Risque et Aléa Inondation de Villes Côtières : Approche quantitative et diffusion par la réalité virtuelle* ». Les nombreuses rencontres et échanges avec les équipes de recherches impliquées ont permis de faire progresser significativement ce travail de recherche qui a donné lieu à des publications scientifiques conjointes.

Je tiens à remercier *Stéphane Costa*, professeur des universités au laboratoire LETG-Caen pour les nombreux échanges que nous avons eu, les nombreux conseils qu'il a su apporter et également son soutien pour faire progresser cette thèse au long de ces trois années.

Je souhaite remercier *Candide Lissak*, maîtresse de conférences au laboratoire LETG-Caen pour son soutien et son appui (et oui bientôt 5 ans maintenant depuis le Queyras !), notamment sur la partie SIG et l'évaluation des conséquences potentielles. *May the force be with you!*

Un grand merci *Yannick Thiery*, chercheur au BRGM Orléans dans l'équipe « *Risque et prévention* » pour avoir grandement contribué à ce travail de recherche. Son soutien ainsi que ces nombreuses remarques et conseils ont toujours été justes et cela a été un véritable plaisir de travailler ensemble.

Je désire également remercier *Daniel Delahaye*, professeur des universités au laboratoire LETG-Caen pour avoir apporté ses conseils durant les comités de suivi scientifiques.

Merci également à *Mohand Medjkane*, ingénieur de recherche au laboratoire LETG-Caen pour ses conseils en SIG ainsi que pour les nombreux échanges sur la géomatique, la physique quantique en mêlant poésie et littérature et cela pendant une même soirée.

Merci à *Imen Turki*, maîtresse de conférences au laboratoire M2C-Rouen pour son aide en analyse statistique et ses conseils sur la prise en compte des concomitances.

Merci à *Arnaud Thulie*, chargé de mission géomatique au ROL (Réseau d'Observation du Littoral de la Normandie et des Hauts-de-France) pour ses conseils en SIG ainsi que pour les bases de données géographiques transmises et qui ont été d'une aide précieuse.

Merci à *Olivier Cantat*, maître de conférences HDR au laboratoire LETG-Caen pour les données météorologiques transmises et les traitements réalisés pour que je puisse compléter les analyses statistiques.

Merci également à *Robert Lafite*, directeur du laboratoire M2C-Rouen pour son accueil au laboratoire M2C-Rouen.

Je tiens également à remercier *Vincent Viel* et *Malika Madelin*, tous deux maîtres de conférences à l'université Denis Diderot (Paris 7) pour avoir bien voulu faire partie de mon comité de suivi de thèse « *Bien-être* ». Merci également à eux pour les moments passés ensemble, leurs bonnes humeurs et les connaissances qu'ils ont su me transmettre quand j'étais en licence et master. Je tiens tout particulièrement à remercier *Vincent Viel* qui m'a fait découvrir le monde de la recherche avant la thèse.

Merci à *Marie Jabbar*, post-doctorante du projet RAIV-COT, au laboratoire LETG-Caen pour son aide sur l'analyse des effets de concomitance et les données (marines) qu'elle a pu me transmettre.

Merci également à *Lisa Baulon*, stagiaire M2R au laboratoire M2C-Rouen qui m'a apporté une précieuse aide à travers un inventaire des événements hydrologiques qu'elle a réalisé.

Je tiens également à remercier *Robert Davidson*, ingénieur d'étude au laboratoire LETG-Caen pour les connaissances qu'il a pu me transmettre quand nous allions sur le terrain ensemble et pour sa bonne humeur (allez les pingouins !).

Un très grand merci à *Blandine Parey*, assistante d'édition au laboratoire LETG-Caen pour la relecture de ce manuscrit, pour son efficacité à gérer tout type d'événement au niveau administratif ainsi que pour sa bonne humeur quotidienne.

Merci à tous les membres titulaires du laboratoire LETG-Caen que je n'ai pas encore cité dont *Romain Reulier* et *Jean-Michel Cador*, maîtres de conférences, ainsi que *Marie-Paule Bataillé*, assistante-ingénieur pour son écoute.

Merci à tous les doctorants et jeunes docteurs pour avoir su créer une ambiance conviviale et solidaire qui restera un souvenir inoubliable de ces trois années passées ensemble. Merci donc à *Thomas Roulland*, *Guillaume Thirard*, *Axel Beauchamp*, *Arthur Glais*, *Thibault Preux*, *François Beauvais*, *Fanny Le Guillou*, *Bastien Peuziat*, *Louis Kadryl Yembi Yembi* et *Vincent Compain*. Et désolé pour le martèlement de clavier en période de rédaction.

Je ne saurais oublier mes amis qui m'ont soutenu et accompagné toutes ces années. Merci donc à la team les fashions copines comprenant *Nicolas Caltagirone*, *Alexis D'Hérain*, *Dorian Girard*, *Xavier Laborie*, *Julie Loichot, Thomas Vollot*. Merci également à *Kristina Boroz*, *Xavier Forthoffer* ainsi que *Finka* et *Stefo Boroz*.

Je ne saurais exprimer toute ma gratitude envers ma famille qui m'a soutenue depuis toujours et qui m'a accompagné dans les moments difficiles. Merci à *Philippe*, *Sandrine* et *Cécile Graff* pour leur soutien quotidien.

Merci à ma chère *Ivana Boroz* qui a été une vraie Cheerleader pendant ces trois années de thèse. Merci à toi, à la patience que tu as su montrer et à l'écoute que tu as su m'apporter dans les moments difficiles.

« La folie, c'est de faire toujours la même chose et de s'attendre à un résultat différent »

Albert Einstein

Résumé de la thèse

Les environnements côtiers en Normandie sont propices à de multiples aléas (érosion, submersion marine, inondation par débordement de cours d'eau, crue turbide par ruissellement, mouvement de versant côtier ou continental). Des interactions entre aléas vont se produire au sein des versants et des vallées où les populations côtières et leurs activités tendent à se densifier depuis le XIXe siècle. Dans le cadre de cette thèse de doctorat, deux principaux objectifs ont été retenus : (1) un développement méthodologique sur les analyses des conséquences potentielles en considérant les éléments exposés au sein d'un territoire d'étude à travers une approche multiscalaire ; (2) la mise en évidence et la quantification des effets des concomitances hydrologiques (lame d'eau et extension spatiale) liés aux blocages des écoulements fluviaux par la mer dans les embouchures à partir d'une analyse spatiale et d'une modélisation hydraulique sous HEC RAS. Ce travail de recherche a été divisé en cinq chapitres :

Le chapitre 1 est consacré à la présentation du cadre physio-géographique du littoral normand et des spécificités de trois sites d'études particulièrement exposés à de multiples phénomènes hydrogravitaires. Le contexte morphostructural, météo-climatique, hydrologique, hydrodynamique et sociétal est présenté à l'échelle régionale. Puis pour chacun des trois sites, les enjeux et les multiples phénomènes hydrogravitaires sont décrits.

Le chapitre 2 se focalise sur la caractérisation des éléments exposés à travers une approche multiscalaire et s'appuie sur un article paru dans la revue *Applied Geography* (Graff *et al.*, 2019b). Sur la base d'une synthèse bibliographique, et pour chacune des échelles spatiales (moyenne, large et locale), les critères d'analyses ont été choisis pour chacun des éléments exposés. Ce développement méthodologique requiert une harmonisation des différentes bases de données utilisées. Deux modèles d'intégration ont été produits sur la base de modèles ETL (*Extraction transformation loading*).

Le chapitre 3 est une quantification des conséquences potentielles sur des éléments exposés à travers une approche multiscalaire et repose sur un article paru dans la revue *Natural Hazard* (Graff *et al.*, 2019a). Cette quantification s'appuie sur une adaptation de la méthode PDI (*Potential damage index*) en modèle APC adapté à des environnements côtiers. Après avoir présentés les résultats du modèle APC à trois échelles spatiales, des essais d'intégration à des analyses de risques sont réalisés afin de pouvoir être *in fine* intégrées à des analyses multirisques.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude des concomitances hydrologiques partant d'abord d'une approche historique. Puis une analyse statistique (régression linéaire multiple) de chroniques de données hydrologiques, météorologiques et marégraphiques permet d'estimer les lames d'eau excédentaires, c'est-à-dire les hauteurs d'eau supplémentaires engendrées par les conditions marines.

Le chapitre 5 présente les différents résultats issus d'une modélisation hydraulique (sous HEC RAS) pour rejouer spatialement des événements concomitants et donc reproduire les champs d'extension des inondations avec et sans blocage des écoulements fluviaux par la mer (*i.e.* la surface et le volume d'eau excédentaire).

Mots clés : *éléments à risque, conséquences potentielles, concomitance hydrologique, modélisation hydraulique, régression linéaire multiple, SIG*.

Introduction générale

Contexte de la recherche

Les environnements côtiers sont des systèmes complexes où les interactions physiques, écologiques et socio-économiques sont particulièrement fortes (Hildebrand et Norrena, 1992). Deux types d'environnement sont alors à distinguer : (1) les côtes d'accumulation (plages, dunes, deltas, lagunes, marais maritimes, etc.) qui peuvent connaître alternativement des phases de progradation et d'érosion et (2) les côtes d'ablation (côtes rocheuses, falaises, etc.) qui ne peuvent que reculer, et dont l'ablation sera fonction des matériaux et des conditions hydrodynamiques en présence (Costa *et al.*, 2015). Ces différents environnements vont évoluer sous l'action d'agents et de processus marins (houles, marées et courants associés) et continentaux. Leurs évolutions parfois intenses peuvent impacter fortement des secteurs urbanisés à haute valeur sociétale et économique (Fleischhauer *et al.*, 2005). Les dégâts provoqués par ces agents et processus se concentrent parfois sur des espaces littoraux restreints et de faible altitude (vallées, vallons, valleuses) souvent fortement urbanisées. Ces espaces/territoires catalysent donc divers aléas qui peuvent se combiner dans le temps et/ou l'espace (érosion, submersion marine, inondation par débordement de cours d'eau ou remontée de nappe, crue turbide par ruissellement, mouvement de versant côtier ou continental). De par sa position d'interface, le littoral est un milieu dynamique, et sa mobilité est le résultat d'ajustements entre formes et processus qui s'effectuent à divers pas de temps, à savoir depuis l'échelle instantanée de la marée, de la houle ou de l'événement tempétueux, à celui des variations géologiques du niveau moyen de la mer. À l'échelle historique récente, le nord-ouest de l'Europe (Manche et Mer du Nord), est marqué par une dynamique régressive de près de 20 % de son linéaire (EEA, 2012) (Figure I.1).

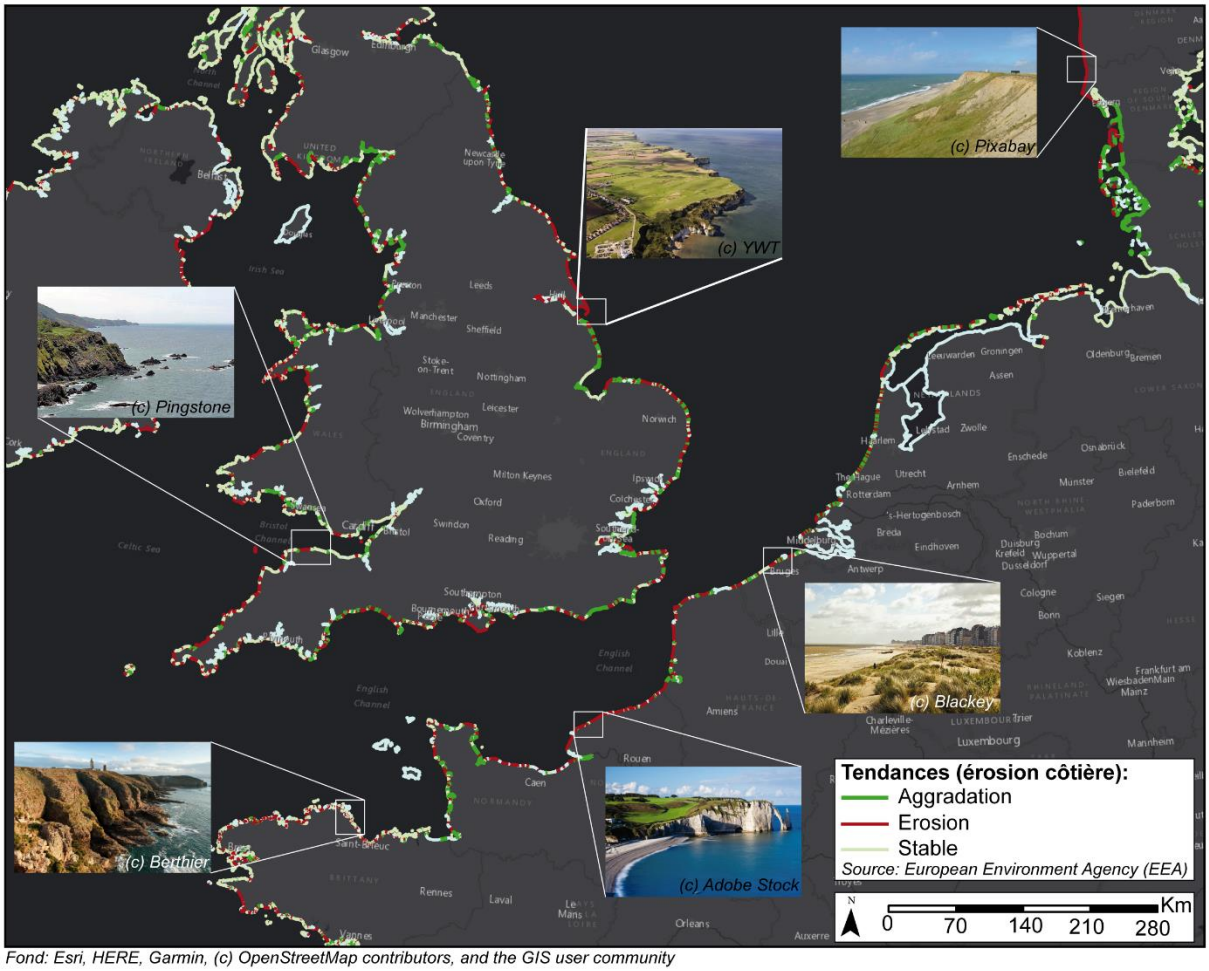
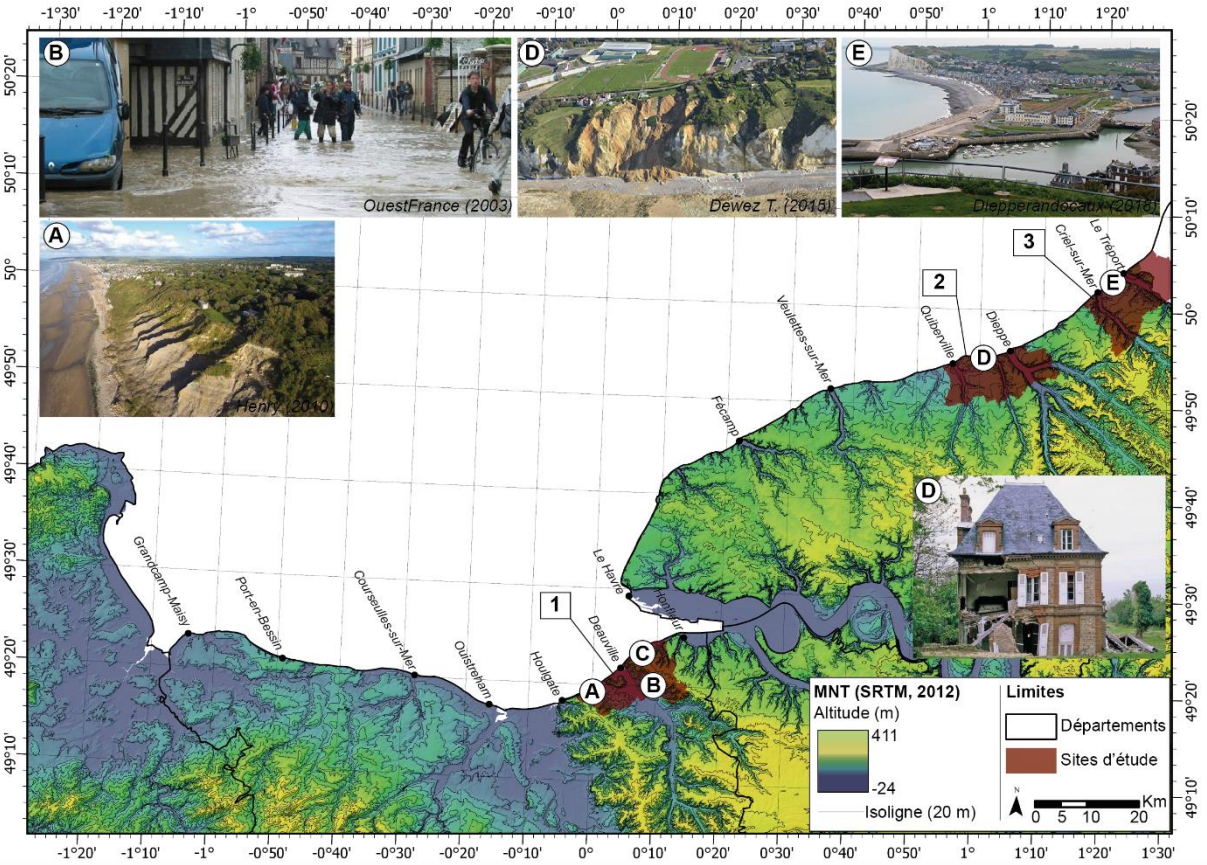


Figure I.1 : Tendances évolutives du linéaire côtier du nord-ouest de l'Europe (données issues de l'*European Environment Agency*, 2012)

A l'échelle de la France métropolitaine, et au cours des 60 dernières années, 25 % du linéaire côtier connaissent une tendance à l'érosion (CEREMA, 2015). En revanche, si ne sont considérées que les côtes d'accumulation, notamment celles non affectées par la présence d'ouvrage de défense contre la mer (indiquant que des problèmes d'érosion ont existé), et les côtes à falaises qui reculent à l'échelle humaine, c'est plus de 50 % du littoral métropolitain qui sont en proie à l'érosion (CEREMA, 2015). Cette situation risque de perdurer, voire de s'accentuer pour de nombreuses sections côtières dans un contexte de réchauffement climatique contemporain et d'élévation du niveau moyen des mers.

En raison de leurs caractéristiques morphostructurales et du contexte hydrodynamique actuel, les littoraux normands sur lesquels s'effectue ce travail doctoral, et notamment ses côtes à falaises, sont affectés par une dynamique régressive importante (Figure I.1Figure I.2). De par leur nature marno-calcaire à argilo-crayeuse, meuble ou cohérente, ces falaises sont affectées par de multiples processus marins et continentaux, et par conséquent, par d'importants mouvements de versant aboutissant à des retraits annuels décimétriques (Maquaire, 1990 ; Costa, 1997 ; Lissak, 2012 ; Fressard, 2013 ; Letortu, 2013). Ces falaises sont entrecoupées par des vallées drainées ou pas, plus ou moins perchées et souvent occupées par les populations côtières et leurs activités. Ces débouchés de vallées, ou valleuses sont également exposés à divers aléas hydrologiques telles que les submersions marines, les inondations continentales et crues turbides (Prêcheur, 1960 ; Delahaye, 2003 ; Douvinet, 2008 ; Costa *et al.*, 2013).



(1) Site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) : (a) Falaises des Vaches Noires soumis à des glissements de terrain et des coulées boueuses ; (b) inondation et crues turbides sur la commune de Touques à l'exutoire des bassins des Valasses le 1er juin 2003 ; (c) maison détruite par les glissements de terrain dans le Cirque des Graves en janvier 1982. **(2) Site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) :** (d) mouvement de masse survenu en décembre 2012 à l'ouest de Dieppe. **(3) Site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer – Ault) :** (e) ville du Tréport pouvant être soumise à des submersions marines et des inondations par débordement de la Bresle.

Figure I.2 : Exemples d'aléas affectant les environnements à falaises de Normandie

Ainsi, ces territoires côtiers à risques sont soumis à des aléas multiples et potentiellement concomitants, à la fois littoraux (érosion et submersion) et continentaux (inondation par remontée de nappe, crues turbides, mouvements de versants). Cette situation peut parfois imposer la nécessité de prévoir la relocalisation des personnes et des biens, notamment dans un contexte de changements environnementaux et sociétaux globaux. Il apparaît donc intéressant de s'interroger sur les impacts futurs et l'évolution de ces processus sur les sociétés (Costa *et al.*, 2004 ; Bird, 2008) pour répondre à la fois à des préoccupations scientifiques de compréhension de la dynamique des littoraux et à une demande sociétale forte, en particulier de la part des gestionnaires des territoires et des risques côtiers.

Dans ce contexte, et dans un but de gestion intégrée des risques des zones côtières, il s'avère nécessaire, d'une part, d'adopter **une démarche multi-aléas et multirisques** tenant compte de la concomitance spatiale ou temporelle de plusieurs aléas et de leurs possibles effets en cascades (Delmonaco *et al.*, 2006 ; Gallina *et al.*, 2016), et d'autre part, d'évaluer **les impacts multisectoriels** engendrés par les différents aléas (Carpignano *et al.*, 2009 ; UNISDR, 2009 ; Mauro *et al.*, 2012 ; Kappes *et al.*, 2012b ; IPCC, 2013 ; Marzocchi *et al.*, 2012 ; Liu *et al.*, 2016 ; Karagiorgos *et al.*, 2016).

L'approche cindynique de ce travail doctoral nécessite de préciser les concepts et les notions qui seront utilisés tout au long de ce travail. Certains, assez classiques (notion de risque, d'aléa, de vulnérabilité …) n'appelleront pas de larges commentaires. En revanche, d'autres plus récents dans leur étude (concomitance) nécessitent de plus amples explications.

La **notion de risque** est un concept évolutif, adapté par les auteurs en fonction du contexte géographique, des approches utilisées ou des échelles d'analyses spatiales considérées. Toutes ces définitions intègrent, d'une part, la notion d'aléa, et d'autre part, la notion de conséquences potentielles sur des éléments exposés (EEs) ou appelés, également par la suite, éléments exposés (EE) plus ou moins vulnérables (D'Ercole et al., 1994, 2009 ;Léone *et al.*, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Pigeon, 2002 ; Maquaire *et al.*, 2004 ; Crozier *et* Glade, 2005 ; Birkmann, 2007 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2007 ; Puissant *et al.*, 2013). Le risque est donc la manifestation d'un phénomène naturel, mesurable dans l'espace et le temps et ayant un impact sur des conséquences potentielles au sein d'un territoire (UNDRO, 1979 ; UNDP/BCPR, 2004 ; Fell *et al.*, 2005 ; Malet *et al.*, 2006). La notion de conséquence se comprend comme la plus ou moins grande vulnérabilité d'un élément exposé (D'Ercole et al., 1994, 2009 ; Pigeon, 2002 ; Lissak, 2012 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) (Figure I.3).

Un aléa se définit par une intensité et une composante spatiale et temporelle (Cruden et Fell, 1997 ; Fell *et al.*, 2005 ; Thiery, 2007 ; Birkmann, 2007 ; Fuchs *et al.*, 2012 ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Birkmann et Welle, 2015). La susceptibilité (composante spatiale) comprend l'extension maximale d'un événement (Aleotti *et* Chowdhury, 1999 ; Malet *et al.*, 2004 ; Thiery *et al.*, 2005). La composante temporelle comprend une analyse des fréquences des événements et sa probabilité d'occurrence en fonction de facteurs déclenchants (ou forçages) (Flageollet, 1989 ; Thiery *et al.*, 2007 ; Lissak *et al.*, 2014 ; Fressard *et al.*, 2016).

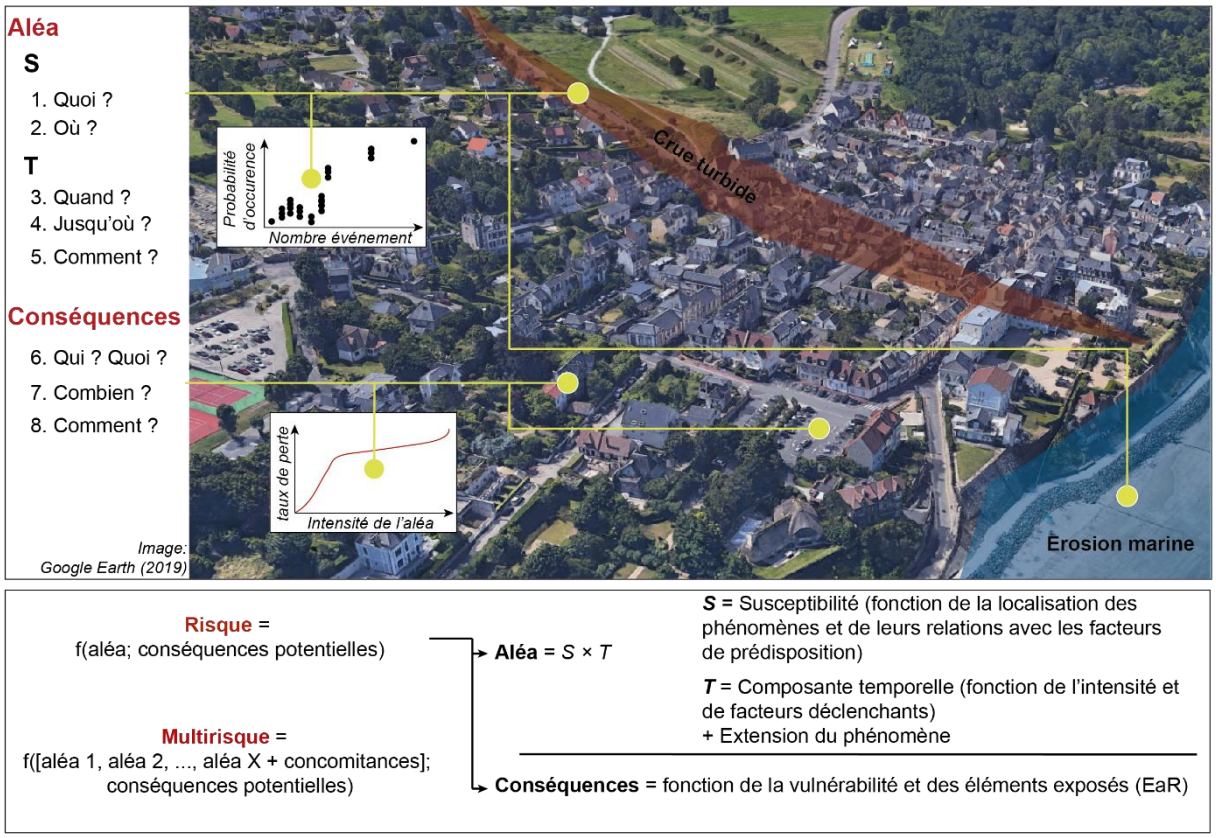


Figure I.3 : Approche et définition du risque et du multirisque retenues dans cette étude à travers l'exemple de Villerville dans le Calvados (14) (adapté de Thiery, 2007)

Les conséquences potentielles sont liées à un élément exposé (EE) pouvant être spatialisé et impacté négativement sur un territoire (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007). Le concept de vulnérabilité fait référence à un niveau d'endommagement potentiel d'un EE pour une intensité d'aléa donné (Léone *et al.*, 1996 ; Kappes *et al.*, 2012b). Différentes formes de vulnérabilité vont alors être quantifiables selon diverses approches ou contextes géographiques (Tapsell *et al.*, 2010 ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Ciurean *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018). Dans le cas d'une analyse multi-aléas, il convient de prendre des critères communs pour décrire la vulnérabilité des éléments exposés (van Westen *et al.*, 2008 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Chen *et al.*, 2016 ; Ciurean *et al.*, 2017). En effet, **trois formes de vulnérabilité** sont généralement considérées :

1) La **vulnérabilité physique (corporelle)** : faisant référence à un nombre de personnes pouvant être affectées, blessées, tuées ou pouvant devenir sans-abris (Varnes, 1984 ; El Morjani *et al.*, 2007 ; Kappes *et al.*, 2011 ; Rosendahl Appelquist et Halsnæs, 2015). Ces indicateurs sont habituellement étudiés à l'échelle des communes ou de surfaces plus ou moins vastes (Fuchs *et al.*, 2012 ; Dowling et Santi, 2014 ; Hénaff et Philippe, 2014 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). L'âge, la catégorie socioprofessionnelle, le niveau d'éducation, etc. ne sont pas compris dans cette forme de vulnérabilité (Clark *et al.*, 1998 ; Cutter *et al.*, 2003 ; Wu *et al.*, 2002 ; Chakraborty *et al.*, 2005 ; Flanagan *et al.*, 2011 ; Carlier *et al.*, 2018).
2) La **vulnérabilité structurelle** : représente l'ensemble des biens matériels et indicateurs faisant référence aux propriétés ou caractéristiques des infrastructures pouvant être impactées négativement par un agent naturel (Léone *et al.*, 1996 ; Zanchetta *et al.*, 2004 ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Eidsvig *et al.*, 2017 ; Milanesi *et al.*, 2018). Cette notion englobe les zones bâties, les réseaux de transport, d'énergie et les bâtiments tels que les maisons, les appartements, etc… (Maquaire *et al.*, 2004 ; Douglas, 2007 ; Akbas *et al.*, 2009 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Eleutério *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013).
3) La **vulnérabilité fonctionnelle (directe)** : se comprend comme l'activité première d'un EE au sein d'un système ou d'un territoire (Scheuer *et al.*, 2011 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017 ; Kantamaneni *et al.*, 2018). La fonctionnalité peut donc prendre différentes formes (résidentielle, commerciale, de secours, industrielle, touristique, agricole, etc.), mais elle se distingue de la nature de l'EE (maison, immeuble, local, surface en herbe, etc.) (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007 ; van Westen *et al.*, 2008 ; Petrucci et Gullà, 2010 ; Corominas *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Chen *et al.*, 2016).

Les autres formes de vulnérabilité (sociale, fonctionnelle indirecte, environnementale, etc…), ainsi que les différentes formes de résilience, sont déterminées à partir d'enquêtes de terrain (Cutter *et al.*, 2003 ; Carlier *et al.*, 2018), ou estimées plus généralement à l'échelle des municipalités à travers des données issues d'instituts statistiques (Clark *et al.*, 1998 ; Wu *et al.*, 2002 ; Flanagan *et al.*, 2011).

L'étude des conséquences potentielles des éléments exposés plus ou moins vulnérables à tel ou tel aléa s'effectue traditionnellement selon **deux approches** : (1) l'approche **type « expert »** et (2) l'approche **type « ingénierie »** (Chen *et al.*, 2016 ; Penadés-Plà *et al.*, 2016 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Ces deux approches sont à distinguer des méthodes de mesure (qualitatif, quantitatif ou semi-quantitatif) qui peuvent être interopérables par discrétisation ou classification (Laaribi, 2000 ; Saaty et Vargas, 2001 ; Birkmann et Welle, 2015).

L'approche **type « expert »** repose sur une vision subjective et intuitive, d'un ou plusieurs opérateurs, des aléas et des conséquences potentielles (Leroi, 1996 ; Petley *et al.*, 2002 ; Barlow *et al.*, 2003 ; Malet *et al.*, 2004 ; van Westen, 2004 ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Gumus *et al.*, 2016). Habituellement utilisées dans un contexte de prévention des risques (e.g. PPR - MATE/METL,

1999a, 1999b, 2016), les méthodes liées à cette approche requièrent généralement peu de données et sont « assez rapides » à mettre en place (Muis *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2016 ; Penadés-Plà *et al.*, 2016). Ces méthodes liées consistent en des systèmes de classification (description en mot, e.g. fort, moyen, faible) et de combinaison matricielle des différentes composantes du risque (Zanchetta *et al.*, 2004 ; Kang et Kim, 2016 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Afin de réduire les incertitudes liées à cette part de subjectivité, des méthodes orientées indices (semi-quantitatives) ont été développées telles que le *Potential Damage Index* (PDI) ou le *Relative Vulnerability Index* (RVI) (Maquaire *et al.*, 2004 ; Malet *et al.*, 2006 ; van Westen *et al.*, 2008 ; Kappes *et al.*, 2012a ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018).

L'approche **type « ingénierie »** se fonde, d'une part, sur une analyse des relations statistiques entre des phénomènes passés et observés, et d'autre part, sur un calcul détaillé de la valeur (monétaire ou absolue) des conséquences potentielles (Léone *et al.*, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Thiery, 2007 ; van Westen *et al.*, 2008 ; Alnedawy *et al.*, 2015). Cette approche s'intègre dans un contexte de gestion des risques (e.g. estimation des coûts-bénéfices d'une relocalisation des biens et des personnes) et peut être intégrée à des plans-programmes (Barbolini *et al.*, 2004 ; Haugen et Kaynia, 2008 ; Akbas *et al.*, 2009 ; Mavrouli et Corominas, 2010 ; Quan Luna *et al.*, 2011 ; Li *et al.*, 2016 ; Azad *et al.*, 2018). Les méthodes développées, telles que les courbes de vulnérabilité, logiques floues, réseaux neuronaux, etc., demandent cependant une importante quantité de données et des outils parfois complexes à mettre en place (van Westen *et al.*, 2008 ; Akbas *et al.*, 2009 ; Petrucci et Gullà, 2010 ; Totschnig *et al.*, 2011 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Li *et al.*, 2016 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Elles ne peuvent donc pas être répliquées sur tous les territoires d'études, dépendent fortement des données disponibles et peuvent engendrer de fortes incertitudes en cas d'extrapolation (Vassiliadis *et al.*, 2002 ; van Westen *et al.*, 2008 ; Kitchin, 2014 ; Lee et Kang, 2015 ; Muis *et al.*, 2015 ; Saint-Martin *et al.*, 2018 ; Zhang *et al.*, 2018).

Si le cadre méthodologique pour évaluer les risques est bien défini (Figure I.4), en revanche, **les analyses multi-aléas et multirisques** en sont à un stade encore exploratoire (Lozoya *et al.*, 2011 ; van Westen *et al.*, 2011 ; Kappes *et al.*, 2012a et 2012b ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2016). D'une manière générale, les analyses multirisques sont incomplètes et consistent en une simple superposition des risques, amenant à de nombreuses incertitudes (Gallina *et al.*, 2016 ; Bathrellos *et al.*, 2017).

Ces difficultés sont dues au niveau des **approches méthodologiques** classiquement utilisées. Ces différentes approches considèrent les aléas et risques indépendamment les uns des autres, aussi bien en termes de méthodes que de résolutions (Greiving, 2006 ; Farrokh et Zhongqiang, 2013 ; Komendantova *et al.*, 2014). D'autre part, l'intégration de **processus ayant des origines différentes** (marines, continentales, etc.) peut engendrer d'importantes incertitudes et rendre complexe l'analyse globale des risques (Olfert *et al.*, 2006 ; Schmidt-Thomé, 2006 ; Garcia-Aristizabal *et al.*, 2015). Enfin, les incertitudes sont liées aux effets de **dépendance, d'interdépendance et de concomitance des aléas** ce qui inclut les effets en cascade et effets aggravants (Delmonaco *et al.*, 2006 ; Marzocchi *et al.*, 2009 ; van Westen *et al.*, 2011 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Gill et Malamud, 2014 ; Gallina *et al.*, 2016).

Les concomitances et effets associés font référence à la notion de simultanéité spatiale ou temporelle (Delmonaco *et al.*, 2006 ; Thour*et al.*, 2014 ; Liu *et al.*, 2016 ; Ettinger *et al.*, 2016). **Quatre cas de concomitance spatio-temporelle** (CST) sont envisageables au regard des informations recueillies dans la littérature (Papathoma-Köhle *et al.*, 2017) (Figure I.5) :

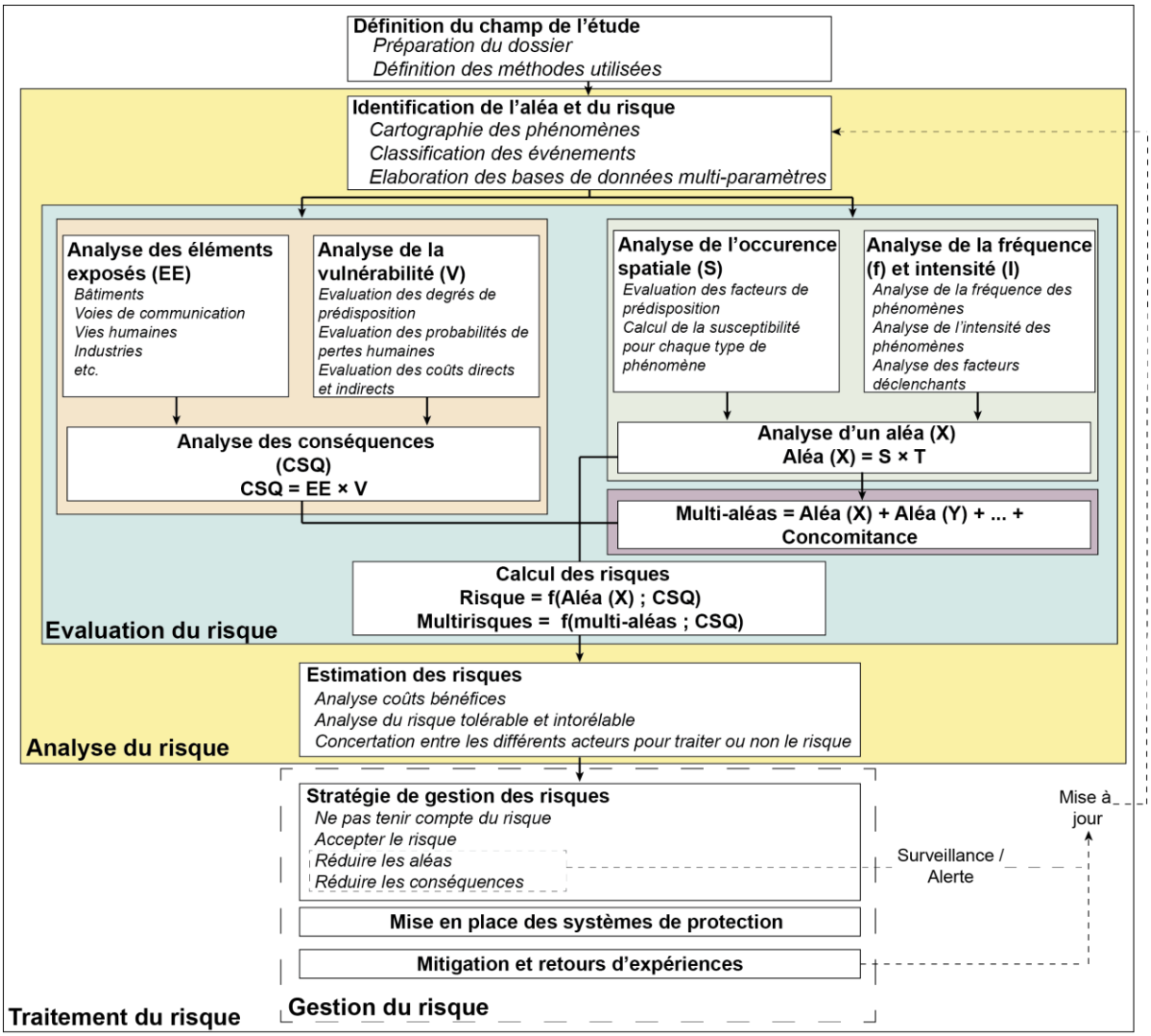


Figure I.4 : Démarche d'évaluation et de gestion des risques et du multirisque (modifiée d'après Crozier et Glade, 2005)

Cas n°1 : les événements se produisent au même endroit, mais à des périodes de temps différentes (**similarité spatiale et désynchronisation temporelle**). Cette situation peut engendrer des **effets en cascade indirects** (e.g. réactivation d'un glissement à la suite d'une inondation) ;

Cas n°2 : les événements se produisent à des endroits et à des périodes de temps différents, mais affectent des secteurs « assez proches » d'un même territoire (par exemple une commune) ce qui constitue le cas le plus commun (**dissimilarité spatiale et désynchronisation temporelle**). Dans cette configuration, les aléas sont déconnectés les uns des autres ;

Cas n°3 : les événements se produisent au même endroit et sur la même période de temps (**similarité spatiale et synchronisation temporelle**). Dans cette configuration, des **effets en cascade directs** peuvent se produire (e.g. dans le cas d'une concomitance hydrologique, la coïncidence entre une submersion marine et le débordement d'un cours qui amplifie la zone inondée) ;

Cas n°4 : les événements se produisent à des endroits différents, mais durant la même période (**dissimilarité spatiale et synchronisation temporelle**). Dans cette configuration, les aléas

sont déconnectés les uns des autres, mais peuvent entraîner des effets aggravants sur les éléments exposés (e.g. une route peut être barrée par une coulée de boue et empêcher les secouristes à accéder à une zone inondée).

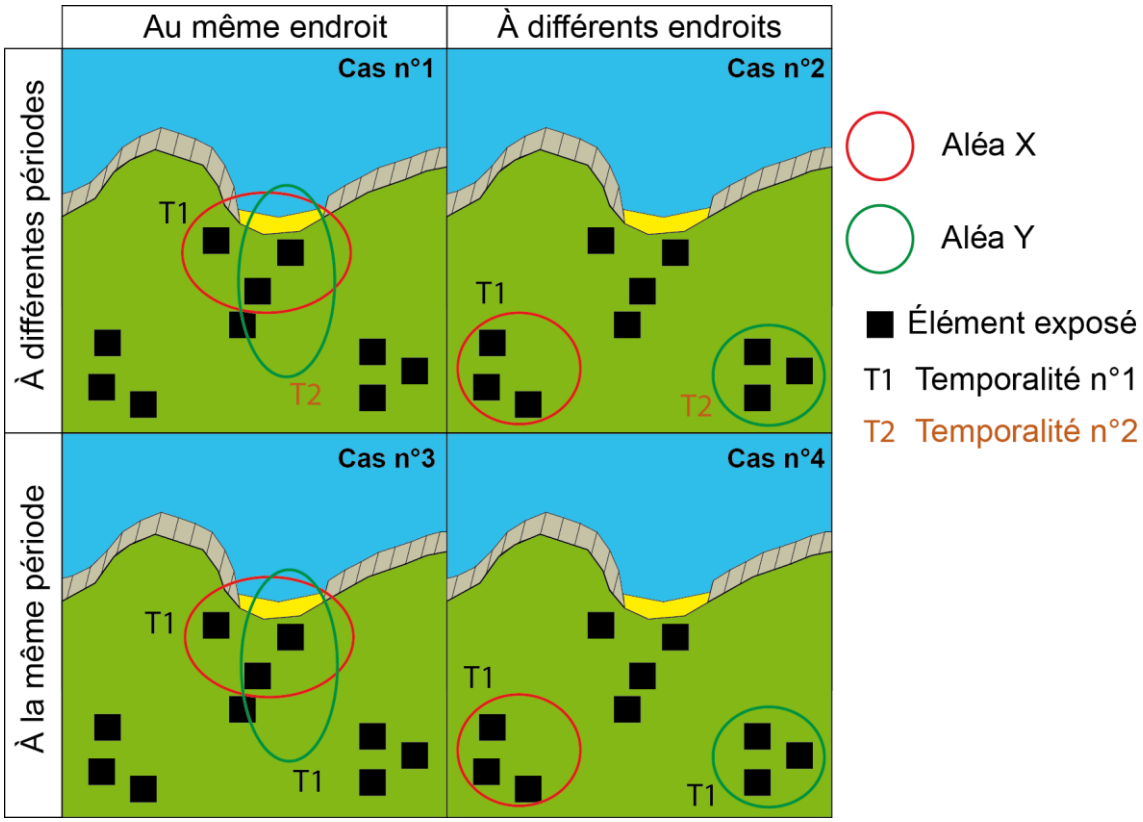


Figure I.5 : Les quatre possibilités de concomitance spatio-temporelle

À partir de ce constat, **deux approches ont été développées** afin d'intégrer les effets en cascade (focalisés sur les aléas) ou les effets aggravants (focalisés sur les éléments exposés) :

1) Les **approches par analyse des aléas seuls ou conjoints** (Pescaroli et Alexander, 2015). L'objectif de cette approche est de déterminer les interactions, extensions, intensités et changements d'occurrences entre les différents aléas et de définir des potentiels effets en cascade (Delmonaco *et al.*, 2006 ; Gill et Malamud, 2014 ; Mignan *et al.*, 2014 ; Duncan *et al.*, 2016 ; Montz et al., 2017). Des méthodes matricielles (pouvant être représentées sous la forme de réseaux de liaison) ont été élaborées afin de déterminer l'impact d'aléas « primaires » sur des aléas « secondaires » ou « tertiaires » (Knapen *et al.*, 2006 ; Gill et Malamud, 2016, 2017). Des systèmes de « ranking » et d'indices ont également été élaborés afin de quantifier la part d'influence de processus d'origines différentes dans le processus global de déclenchement du ou des aléas (Kappes *et al.*, 2012a ; Gill et Malamud, 2017).

2) Les **approches par analyse des vulnérabilités, indépendamment des aléas** (Zahran *et al.*, 2008 ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Gill et Malamud, 2017). L'objectif de cette approche est de caractériser ou quantifier les effets aggravants possibles sur les éléments exposés au sein d'un territoire (Reghezza, 2006 ; Fuchs *et al.*, 2012 ; Jeffers, 2013 ; Reghezza et Rufat, 2016). Les méthodes développées au sein de cette approche évaluent dans un premier temps les courbes de dommages potentielles pour chacun des éléments exposés identifiés. Ces différentes courbes de dommages sont ensuite synthétisées à travers une fonction de dommage globale (Haimes, 2009 ; Blaikie *et al.*, 2014 ; Garcia-Aristizabal *et*

al., 2015 ; Van der Fels-Klerx *et al.*, 2018). Des méthodes matricielles ou orientées « indices », permettent de simplifier l'analyse des effets aggravants portés sur les EEs et leurs conséquences potentielles (van Westen *et al.*, 2008 ; Kappes *et al.*, 2012a ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Birkmann et Welle, 2015 ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Carlier *et al.*, 2018).

Les approches et méthodes développées sont encore à un stade exploratoire et aucun consensus n'a été défini sur la conduite à tenir pour une analyse multirisque intégrant les effets en cascade et effets aggravants. Les différentes méthodes développées apportent autant d'éléments de réponses que d'incertitudes. Les méthodes par analyse des courbes de vulnérabilités multiples et globales nécessitent énormément de données et engendrent d'importantes incertitudes lors de leurs extrapolations à des EEs, même s'ils sont géographiquement proches (Haimes, 2009 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Garcia-Aristizabal *et al.*, 2015). Les méthodes matricielles nécessitent moins de données que les courbes de vulnérabilité multiple. Cependant, au-delà de l'analyse des impacts d'un aléa primaire sur un aléa secondaire, les complexités des matrices deviennent exponentielles (Gill et Malamud, 2016, 2017 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). En raison de sa plus grande flexibilité, en termes de données à intégrer et de complexité, les méthodes orientées indices représentent un bon compromis à une analyse multi-aléas et multirisques (Kappes *et al.*, 2011, 2012b ; van Westen *et al.*, 2014 ; Karagiorgos *et al.*, 2016 ; Carlier *et al.*, 2018 ; Gerkensmeier *et* Ratter, 2018).

A la lumière des travaux de recherches réalisés et synthétisés ci-dessus, un certain nombre de points restent à approfondir :

(1) **le développement d'une méthode d'analyse et de quantification des conséquences potentielles.** Le défi majeur de ce développement méthodologique est l'intégration multiscalaire des éléments exposés. Actuellement, les aléas sont analysés par système d'emboîtement d'échelle, avec des changements de résolution, ce n'est pas très souvent le cas des conséquences potentielles et des EEs. Ces derniers sont identifiés à une seule échelle d'analyse, puis sont simplement zoomés ou dézoomés selon les échelles de visualisation retenue. Pour permettre de les identifier selon plusieurs échelles spatiales, des outils (SIG) devraient permettre l'intégration de bases de données multiples au sein d'un seul et même espace de stockage (*Data Warehouse* — DWH). Pour des raisons de transposition et d'adaptation, une approche experte et une méthode orientée « indice » doivent être privilégiées. Les méthodes et outils développés doivent ainsi tenir compte de l'ensemble des EEs présents sur un territoire et permettent la quantification multiscalaire de leurs conséquences potentielles.

(2) **la compréhension des conditions de déclenchement (quand, comment et pourquoi ?) des événements dits « concomitants »**. En effet, l'établissement d'un lien entre les processus côtiers et continentaux devient crucial dans un contexte de changement global où les interactions au sein du continuum terre-mer tendent à s'amplifier et s'intensifier. Une double approche statistique et spatiale doit apporter des éléments de réponse à ces questions. Tout d'abord, il convient d'identifier l'influence des différents processus continentaux et marins durant l'événement et de traduire l'intensité des événements sous la forme d'indice. D'autre part, l'approche spatiale doit apporter des éléments de réponse à l'impact des concomitances en termes d'extension spatiale. Les défis majeurs de cette analyse résident dans : a) l'identification des concomitances à travers différentes sources de données ; b) la définition de la part des événements réellement concomitants de ceux qui relèvent d'une typologie erronée ; c) la caractérisation, puis la quantification du déroulement des concomitances ainsi identifiées.

Objectifs de thèse

Après la description des sites et des aléas, les objectifs assignés à cette thèse de doctorat portent sur : **(1)** l'analyse et la quantification des **conséquences potentielles** sur les éléments exposés et **(2)** l'analyse des **concomitances hydrologiques** entre des débordements de cours d'eau et des hauts niveaux marins (en cas de surcote ou non).

(1) Le développement méthodologique sur les analyses des **conséquences potentielles** doit prendre en considération l'ensemble des éléments exposés au sein d'un territoire d'étude, ainsi que leurs différentes formes de vulnérabilités (corporelle, structurelle et fonctionnelle). Traditionnellement, ces éléments sont identifiés au sein de zones d'aléa connues. Dans le cadre d'une analyse multirisques, la détermination des conséquences potentielles peut-être menée de pair avec l'analyse (multi-) aléas. En considérant l'ensemble des éléments à risque, il devient possible d'établir différents scénarios et de mettre à jour les bases de données en cas d'incertitudes sur l'évolution de ces aléas en lien avec les changements climatiques par exemple. La méthode développée s'articule autour de **quatre points** :

1) L'intégration d'une **approche multiscalaire** durant le processus de quantification des conséquences potentielles (échelle locale 1 : 10 000 – 1 : 2 000 ; échelle moyenne 1 : 10 000 – 1 : 25 000, etc.) basée sur la nomenclature de van Westen (2000) et van Westen *et al.* (2004, 2014) ;
2) Le développement de **modèles d'intégration** (par *visual scripting*) de multiples bases de données, provenant de diverses sources et avec des formats ou résolutions différentes au sein d'une *Data Warehouse (DWH).* Cette harmonisation se base sur une méthode ETL – *Extraction Transformation Loading* sur une plateforme SIG (Ponniah, 2001 ; Vassiliadis *et al.*, 2002 ; Akkala *et al.*, 2010 ; Du *et al.*, 2015 ; Kang et Hong, 2015 ; Bouadi *et al.*, 2017 ; Silva *et al.*, 2017) ;
3) **L'adaptation des méthodes orientées « indices » à l'environnement littoral**, type *Potential Damage Index* (PDI) développées dans le cadre du projet européen ALARM (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas*, 2002-2004), afin de considérer les différentes formes de vulnérabilité des EEs (Maquaire *et al.*, 2004 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) ;
4) Le développement de **systèmes de pondération attributaire et spatiale** (prenant la forme d'arbres de décision) et de représentation graphique 3D des conséquences potentielles sur plateformes SIG (Lai *et al.*, 2015 ; Gumus *et al.*, 2016).

(2) L'apport d'éléments de compréhension sur les **concomitances hydrologiques**. Les concomitances hydrologiques comprennent l'ensemble des périodes de hautes eaux en rivière et hautes eaux en mer. Les autres types de concomitance (glissements de terrain, crues turbides, etc.) ne sont pas abordés dans cette recherche. Ainsi, cette approche se fonde sur une analyse des événements historiques (tempêtes et débordements de cours d'eau) et sur une analyse des chroniques de hauteur d'eau (marégraphes et stations hydrologiques) pour essayer de déterminer les paramètres déclenchant les effets de concomitance. À partir de cette base d'information, des scénarios peuvent être émis pour définir les impacts futurs des changements climatiques (en accentuant certains paramètres – e.g. en augmentant le niveau marin ou l'intensité des précipitations). L'analyse des concomitances hydrologiques repose donc sur :

1) Une **analyse historique des événements hydrologiques et des concomitances** à partir de différentes sources de données liées aux **tempêtes, submersions marines et inondations** (rapport, documents d'archives, bases de données en ligne, journaux, etc.). À la suite de cela, une typologie est réalisée en fonction des informations recensées

(Covello et Mumpower, 1985 ; Dussauge-Peisser *et al.*, 2002 ; Aven, 2011 ; Ortiz *et al.*, 2014) ;

2) Une **analyse statistique (régressive)** et modélisation spatiale des chroniques hydrologiques, climatiques et marines des différents secteurs et bassins. Une analyse croisée des facteurs hydrologiques (e.g. débit de base, niveau de nappe, etc.), climatiques (e.g. précipitations efficaces, réserve utile, etc.) et marins (e.g. niveau observé, surcote, etc.) permet d'estimer la part de hauteur d'eau excédentaire engendrée par ces effets de concomitance (Svensson et Jones, 2004 ; Fisson *et al.*, 2014 ; Pescaroli et Alexander, 2015) ;

3) Le développement **d'un indice de concomitance** à partir des modèles de régression. Cet indice est ensuite corrélé avec les différents événements de tempêtes connus afin de déterminer qualitativement les conditions de déclenchement ou effets aggravants des concomitances (Kappes *et al.*, 2012a, 2012b ; Gill et Malamud, 2016, 2017) ;

4) Une **analyse des effets** (lame d'eau excédentaire et extension spatiale en cas de blocage ou ralentissement des écoulements avec débordements de cours d'eau et inondation des zones basses) engendrés par quelques événements concomitants (tempêtes et crues) et à partir des informations recueillies dans les archives. Cette analyse des impacts permet par la suite de s'intéresser à une évolution potentielle (e.g. +1 m d'élévation du niveau marin à l'horizon 2100 – IPCC, 2013 ; 2019) des événements concomitants (Paskoff, 1998 ; Glade, 2003 ; Jakob *et al.*, 2012 ; Foudi *et al.*, 2015 ; Eleutério *et al.*, 2013).

Soutiens institutionnels et choix des secteurs d'étude

Ce travail de thèse de doctorat démarré en octobre 2016 a été mené principalement dans le cadre du projet ANR RICOCHET[1] « *Évaluation multirisques de territoires côtiers en contexte de changement global* » (2017-2020). Il s'agit d'un projet de recherche collaborative - Entreprises (PRCE) en partenariat entre quatre laboratoires de recherche académiques (LETG-Caen, M2C-Rouen, LETG-Brest et LGO-Brest), un organisme public (BRGM), une association scientifique (IRD2) et une entreprise (AZUR-Drones). Le projet ANR RICOCHET vise à améliorer les connaissances sur les risques en contexte littoral (front de mer et hinterland). Plus spécifiquement, il s'agit d'analyser les interactions possibles entre les différents types de risques (multirisques) en contexte de changement global (climatique et anthropique) et de proposer des méthodes et outils innovants à leurs analyses.

Cette thèse s'inscrit sur trois tâches du projet : la tâche n°3 « Identification et analyse des enjeux sur les territoires d'étude », la tâche n°4 « Identification et quantification à moyen et long terme des événements et relation avec les facteurs de déclenchement » et la tâche n°6 « Analyse multi-aléas/risques et identification de scénarios ». Le projet se poursuivant jusqu'à la fin 2020 avec une prolongation possible jusqu'à mi 2021, l'analyse croisée des processus et du multirisque ne sera pas abordée dans ce travail de thèse de doctorat, mais seulement à la fin de l'ANR RICOCHET.

[1] Projet ANR RICOCHET : http://www-iuem.univ-brest.fr/pops/projects/anr-ricochet-2017-2020

Par ailleurs, ces travaux de thèse apportent également des éléments de réponse dans le cadre des projets de recherche RIN RaivCot[2] (2018-2019) et Fondation de France RevCot[3] (2019-2021) portés par le laboratoire LETG-Caen sur les aspects de concomitance spatio-temporelle des aléas.

Ce travail de thèse de doctorat, tout comme le projet ANR RICOCHET, s'appuie sur trois territoires normands affectés par de multiples processus marins et continentaux et pour lesquels de nombreuses données sont déjà disponibles grâce à plusieurs programmes de recherche (ANR SISCA, CNES-SWOT TOSCA, LabEx MER, Seine Aval, Interreg BERM et BAR, etc.) : la Côte Fleurie (Houlgate à Honfleur) et la Côte d'Albâtre (Le Havre à la baie de Somme) (Figure I.2). Les précédents travaux ont permis d'apporter des éléments de réponses sur lesquels nous nous appuierons :

1) La quantification du recul des falaises et leur apport sédimentaire sur les plages et estrans (Costa *et al.*, 2002, 2003 ; Dewez *et al.*, 2013 ; Letortu *et al.*, 2014 ; Lissak *et al.*, 2014 ; Maanan et Robin, 2015) ;
2) L'analyse des différents processus impliqués dans les glissements de terrain, coulées boueuses et chutes de blocs (Maquaire, 2000 ; Lissak, 2012 ; Fressard, 2013 ; Lissak *et al.*, 2014 ; Roulland *et al.*, 2019) ;
3) La détermination des facteurs de contrôle et de déclenchement responsable du recul des côtes et des glissements (Costa *et al.*, 2002, 2003, 2019 ; Hénaff *et al.*, 2002 ; Letortu, 2013 ; Lissak *et al.*, 2014 ; Letortu *et al.*, 2015) ;
4) L'analyse des liens entre submersions marines engendrées par des tempêtes et les fluctuations climatiques (relations entre la pression atmosphérique et indice du climat) (Turki *et al.*, 2015) ;
5) La quantification des flux sédimentaires dans les bassins littoraux par des mesures à haute fréquence (Laignel *et al.*, 2006, 2008 ; Viel, 2013 ; Landemaine, 2016) et sur les taux d'érosion sur les plateaux argileux normands (Delmas *et al.*, 2012) ;
6) Les dynamiques d'érosion des versants et facteurs de déclenchement des crues turbides dans les vallons secs et drainés (Delahaye, 2008 ; Douvinet, 2008 ; Cerdan *et al.*, 2010 ; Delmas *et al.*, 2012 ; Douvinet *et al.*, 2015).

En parallèle de ces différentes recherches, de nombreuses bases de données ont été développées sur ces secteurs de côte à falaise, que nous utiliserons dans cette thèse. Ces bases de données concernent aussi bien des mesures sur les processus (observatoires de recherche : OMIV-INSU et DYNALIT), des données des organismes référents (SHOM, Météo France, BRGM, …) que des données sur les enjeux du territoire tels que les infrastructures, réseaux de transport et d'énergie, etc. (©OSM, IGN, DREAL, etc.).

[2] Risque et aléa inondation de villes côtières : approche quantitative et diffusion par la réalité virtuelle. Le projet a pour objectif de caractériser et quantifier l'aléa inondation submersion marine et continentale et d'identifier des effets en cascade et concomitance (approche statistique).

[3] Réalité Virtuelle et villes côtières : appropriation de l'aléa et exploration du littoral de demain par la réalité virtuelle. Le projet retrace l'historique des événements hydrologiques et simule les inondations au contact terre-mer.

Structure de la thèse

Les différentes problématiques et objectifs de cette thèse sont abordés à travers cinq chapitres (Figure I.6).

Le **chapitre 1** présente le **cadre physio-géographique** et comprend cinq sections, dont une introduction (section 1.1) et une conclusion (1.4). La section 1.2 est le contexte environnemental régional à travers une présentation des caractéristiques morphologiques, climatiques, hydrologique, hydrodynamique et anthropique. La section 1.3 présente plus spécifiquement chacun des trois sites d'étude retenus (site n°1 : Auberville – Pennedepie ; site n°2 : Quiberville – Dieppe ; site n°3 : Criel-sur-Mer – Le Tréport).

Le **chapitre 2,** qui a donné lieu à un article (Graff *et al.* 2019b dans *Applied Geography*) porte sur le développement d'une méthode de **caractérisation des éléments exposés par une approche multiscalaire** et comprend une introduction du chapitre en section 2.1 et une conclusion du chapitre en section 2.5. La section 2.2 est une synthèse bibliographique permettant de définir des échelles spatiales ainsi que des critères et résolutions adaptés à ces échelles. La section 2.3 est inventaire des bases de données géographiques disponibles ainsi que la mise en place de modèles d'harmonisation de ces données géographiques. La section 2.4 présente les résultats de ces modèles d'harmonisation de ces données à différentes échelles et sur différents sites.

Le **chapitre 3** présente une **méthode de quantification et d'analyse des conséquences potentielles à différentes échelles spatiales**. Ce chapitre a également fait l'objet d'une publication (Graff *et al.* 2019a dans *Natural Hazards*) et comprend une introduction du chapitre en section 3.1 et une conclusion du chapitre en section 3.5. La section 3.2 est l'adaptation de la méthode PDI (*Potential damage index*) en une méthode adaptée aux environnements côtiers : le modèle APC (Attribution, pondération, combinaison). La section 3.3 présente les résultats du modèle sur le site n°1 à travers une approche multiscalaire. La section 3.4 est une discussion sur l'intégration des conséquences potentielles aux analyses multirisques et de sa transposition à différents environnements.

Le **chapitre 4** est une **analyse statistique des concomitances hydrologiques** où nous nous sommes focalisés sur les effets de blocage des écoulements fluviaux par la mer. La section 4.1 est l'introduction du chapitre et la section 4.5 est sa conclusion. La section 4.2 présente le fonctionnement des modèles de régression linéaires multiples utilisés pour cette analyse des concomitances et comprend également un inventaire des données. La section 4.3 détermine trois situations hydrodynamiques sur lesquels nous avons appliqué les modèles de régression : toutes dates confondues, situations propices aux effets de blocages et situation de débordement. La section 4.4 analyse les résultats sur les effets de blocages des écoulements et émet des hypothèses sur leurs évolutions spatiales et temporelles.

Le **chapitre 5** est la **modélisation hydraulique des débordements de cours d'eau liés à des effets de concomitance avec la mer lors des tempêtes** et comprend une introduction du chapitre en section 5.1 et sa conclusion en section 5.6. La section 5.2 est la préparation des données intégrées à la modélisation hydraulique. La section 5.3 concerne plus spécifiquement le fonctionnement de la modélisation hydraulique sous HEC RAS. La section 5.4 présente les résultats des modèles sur la basse vallée de La Touques, la basse vallée Du Dun, la basse vallée de L'Yères et la basse vallée de La Bresle. La section 5.5 analyse les résultats des effets de blocage des écoulements à travers une dimension spatiale.

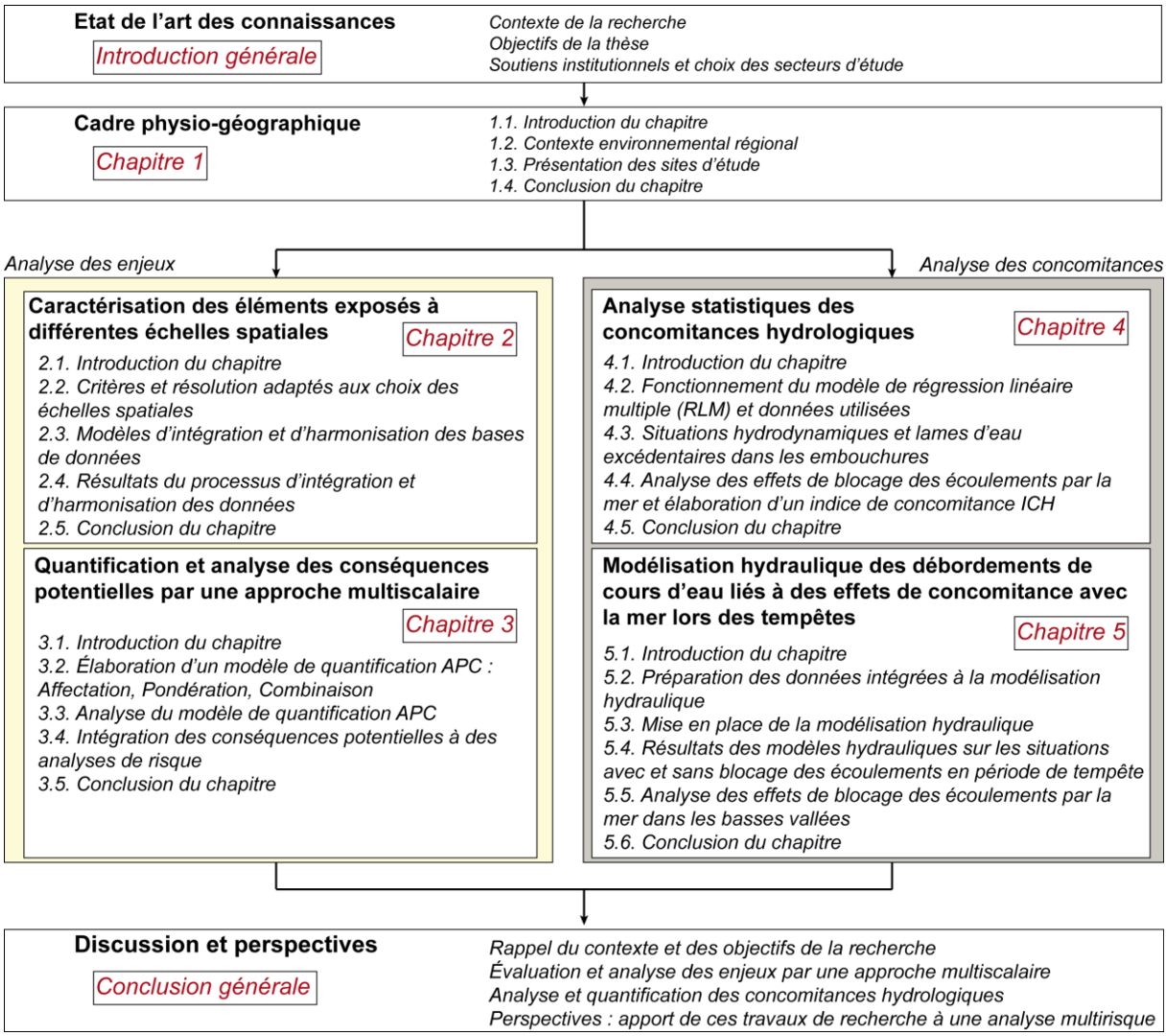


Figure I.6 : Représentation schématique des chapitres et sections de ce mémoire de thèse

Chapitre 1. Contexte physio-géographique

Les territoires côtiers et à falaises de la région Normandie se caractérisent par une alternance de vallées littorales et de plateaux. Au sein des vallées littorales, les stations balnéaires représentent le moteur économique et de vie et sont installées la plupart du temps à l'exutoire des bassins versants pour des raisons d'accessibilité à la mer. Ces vallées et versants sont également propices aux interactions entre les processus marins et continentaux, mettant épisodiquement les populations en situation de danger durant des événements morphogènes. Les principaux événements comprennent des éboulements (entraînant un recul des côtes à falaises), des glissements de terrain, des coulées boueuses, des inondations par débordements de cours d'eau, des submersions marines et des crues turbides. Ce chapitre s'intéresse au contexte physio-géographique du littoral normand afin de présenter, globalement puis localement, les différentes caractéristiques physiques et anthropiques de chacun des sites d'étude et de leurs intérêts pour la recherche entreprise dans le cadre de cette thèse de doctorat.

1.1. Introduction du chapitre

En Normandie, entre 1984 et 2019, 923 arrêtés de catastrophes naturelles liées à la mer ont été prescrits sur 533 communes et 43 % concernent des communes littorales (ROL, 2019). Localisé en bordure du bassin de Paris, le littoral normand peut être affecté par une multitude de phénomènes naturels aussi bien marins que continentaux (Turki *et al.*, 2015 ; Letortu *et al.*, 2019). Sur la frange littorale et arrière littorale, les mouvements gravitaires sont liés au recul du trait de côte, à des chutes de blocs, des glissements de terrain, etc. (Maquaire, 1990 ; Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2014 ; Lissak *et al.*, 2014 ; Michoud *et al.*, 2015 ; Fressard *et al.*, 2016). Les vallées littorales (fonds de vallée) sont plutôt affectées par des phénomènes hydrologiques et hydrodynamiques tels que les submersions marines, les débordements de cours d'eau ou encore les crues turbides (Delahaye, 2003 ; Laignel *et al.*, 2008 ; Douvinet, 2008 ; Viel, 2013 ; Douvinet *et al.*, 2015).

Ces phénomènes hydrogravitaires vont alors avoir un impact sur des aménagements localisés sur le front de mer, dans les fonds de vallée et à l'exutoire des bassins côtiers. En cas d'événement majeur, les dommages peuvent ainsi se chiffrer jusqu'à plusieurs millions d'euros, mais peuvent également entraîner des victimes. Dans un contexte de changement global (climatique et anthropique), il convient aujourd'hui d'engager une analyse croisée de ces phénomènes dans les environnements côtiers et à falaises afin de mieux considérer les impacts multisectoriels des phénomènes gravitaires et hydrogravitaires (Delmonaco *et al.*, 2006 ; Thour*et al.*, 2014 ; Liu *et al.*, 2015 ; Ettinger *et al.*, 2016).

Ce chapitre est une présentation du contexte physio-géographique et se compose, en dehors de l'introduction (section 1.1) et de la conclusion du chapitre (section 1.4), de deux sections. La section 1.2 est une présentation du contexte environnemental de la région Normandie et du littoral normand entre la baie des Veys et la baie de Somme. À partir de cette mise en contexte, la section 1.3 présente plus spécifiquement, et successivement, chacun des trois sites d'étude retenus dans le cadre de ce travail de recherche, mais également dans le cadre du programme ANR RICOCHET.

1.2. Contexte environnemental régional

L'évolution croissante des populations sur le littoral normand couplée à des phénomènes naturels en fait un bon exemple de territoire à risques. Les populations vont tendre à évoluer dans des secteurs propices au développement touristique et à se développer autour des pôles d'activités économiques. Ces secteurs sont parfois impactés par de multiples phénomènes (glissements de terrain, inondations lentes, submersions marines, effondrements et recul du trait de côte, etc.).

La présentation du contexte environnemental régional est subdivisée en cinq sections. La section 1.2.1 est une description des principales formes du relief et de la morphologie du littoral côtier et à falaise de la baie des Veys à la baie de Somme. La section 1.2.2 présente les caractéristiques météo-climatiques de la Normandie. La section 1.2.3 s'intéresse plus spécifiquement aux caractéristiques hydrologiques des bassins littoraux localisés dans les secteurs à falaises. La section 1.2.4 décrit les caractéristiques hydrodynamiques de la mer de la

Manche et les facteurs responsables des submersions marines (tempêtes majeures, etc.). La section 1.2.5 est une présentation des principaux enjeux et de leurs dynamiques à l'échelle de la Normandie. Enfin, la section 1.2.6 est la conclusion de la présentation de ce contexte environnemental régional.

1.2.1. Contexte morphostructural

Le littoral normand s'étend sur le Massif armoricain et le Bassin parisien. La région Normandie offre une multitude de paysages et de reliefs où se mêlent des plaines, des plateaux, des vallées larges, des vallées encaissées, des marais littoraux ou encore des paysages collinéens. Dans ce travail de recherche, et dans le cadre programme ANR RICOCHET, nous nous intéresserons plus spécifiquement aux territoires côtiers localisés entre la baie des Veys et la baie de Somme. Ces territoires côtiers sont propices à de nombreux phénomènes gravitaires (e.g. glissements de terrain, éboulements, effondrements, etc.) et hydrogravitaires (crues turbides, débordements de cours d'eau, etc.) marins et continentaux (Maquaire, 1990 ; Costa, 1997 ; Douvinet, 2008 ; Lissak, 2012 ; Fressard, 2013 ; Letortu *et al.*, 2019 ; Roulland *et al.*, 2019).

La section 1.2.1.1 présente les principaux traits du relief entre la baie des Veys et la baie de Somme et détaille plus spécifiquement, pour les besoins de cette recherche, le Pays d'Auge ainsi que le Pays de Caux. La section 1.2.1.2 est une description de la structure du Pays d'Auge et du Pays de Caux comprenant une présentation de la stratigraphie, de la lithologie ainsi que de la tectonique spécifique à ces paysages côtiers et à falaises. La section 1.2.1.3 décrit les principaux traits morphologiques de ces sites où se produisent de nombreux mouvements gravitaires.

1.2.1.1. Les reliefs de la Normandie entre la baie des Veys et la baie de Somme

La description des principaux traits du relief, ainsi que des clichés utilisés, pour décrire le paysage de la baie des Veys à la baie de Seine, repose en grande partie sur la description faite dans la mise à jour du catalogue sédimentologique des côtes de France dans lequel nous avons contribué (Cerema, 2019)[1].

Le littoral normand s'étend de la baie du Mont-Saint-Michel, localisé au sud-ouest du département de la Manche, jusqu'à la baie de Somme, au nord-ouest de la Seine-Maritime, sur un linéaire côtier d'environ de 435 km (selon le trait de côte de référence Histolitt® SHOM – IGN). Ce littoral offre une grande diversité paysagère, malgré de faibles variations de dénivelés, se présentant sous la forme de vastes zones marécageuses (e.g. Marais du Cotentin), de plateaux, mais également de collines (Figure 1.1). Le point culminant de la région est localisé sur le Massif armoricain, sur la commune d'Ecouves, à 417 m d'altitude.

De la baie des Veys à la baie de Seine (Figure 1.2 – clichés A et B), le littoral se caractérise par une succession de plateaux et dépressions ainsi que longues plages sableuses aux droits des côtes. Depuis Grandcamp-Maisy jusqu'à Dives-sur-Mer, le littoral est localement composé de fins cordons sableux voir de dunes, tel que la côte de Nacre (Figure 1.2 – clichés C et D), et également de falaises d'une quarantaine de mètres d'altitude, tel que la côte du Bessin. L'arrière littoral, localisé dans la plaine de Caen, est relativement plat et peu développé en termes de relief.

[1] Cerema (2019) – Dynamiques et évolution du littoral Fascicule 3 : synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague disponible sur : https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/dynamiques-evolution-du-littoral-fascicule-3-du-cap-antifer

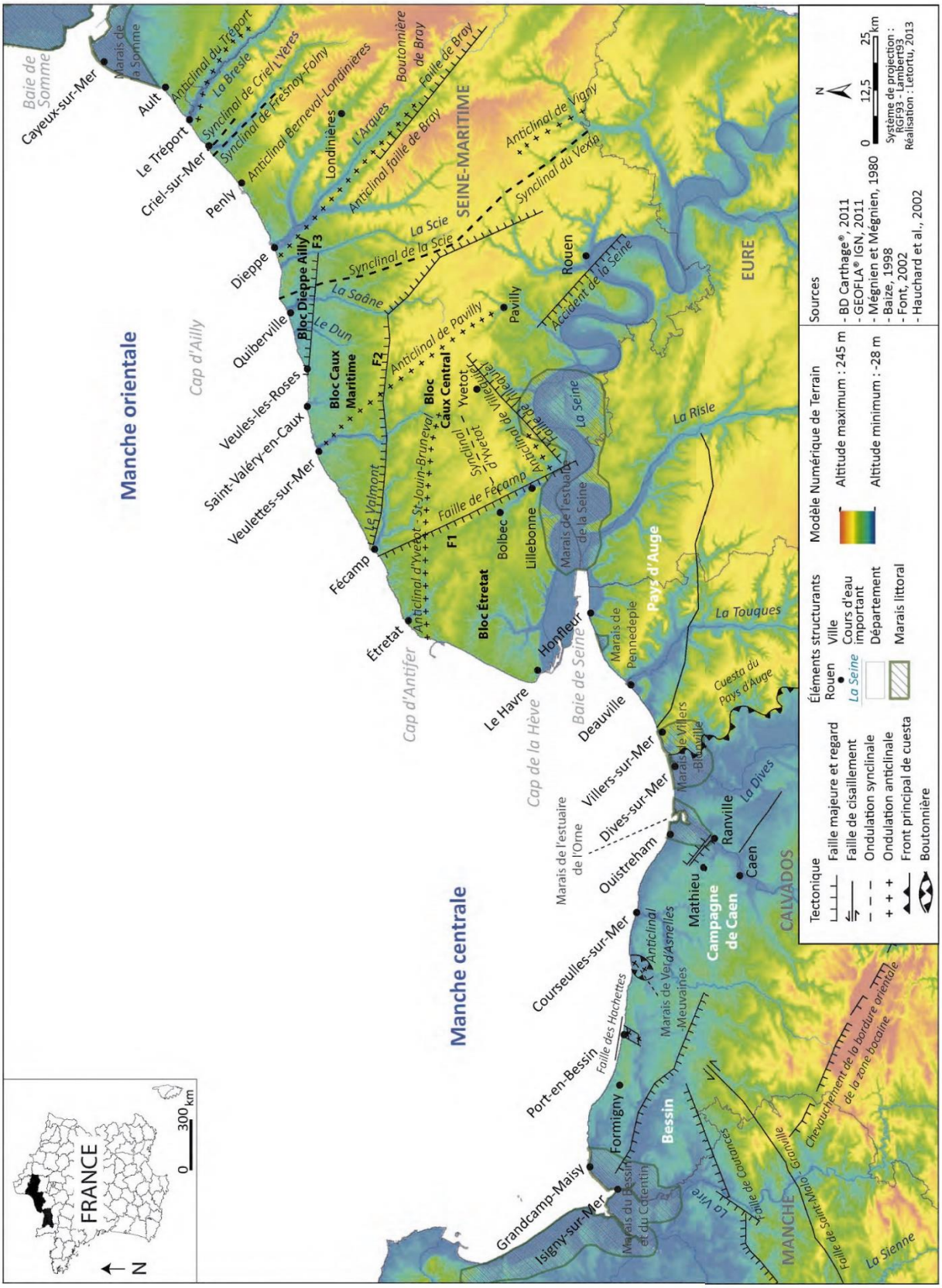


Figure 1.1 : Schéma morphostructural entre la baie des Veys et la baie de Somme (issue de Letortu, 2013 et d'après Mégnien et Mégnien, 1980 ; Baize, 1998 ; Font, 2002 ; Hauchard *et al.*, 2002)

Entre Dives-sur-Mer (plaine de Caen) et Honfleur, le plateau du Pays d'Auge s'étend sur une trentaine de kilomètres pour une altitude variant entre 130 et 200 m. Orienté vers l'est, le plateau affiche des pentes de l'ordre de 1 à 3 % et s'étend jusqu'aux collines du Perche dans le département de l'Orne (61) et aux plateaux du Lieuvin dans l'Eure (27) (Fressard, 2013). Le Pays d'Auge est limité à l'ouest par des falaises meubles allant des Vaches Noires (paysage de badlands) à la Côte Fleurie (paysage de côte à falaises à grands glissements) et se termine dans l'estuaire de la Seine à Honfleur (Elhaï, 1963) (Figure 1.2 – clichés E et F).

Baie des Veys vues sur le schorre (A) avant et (B) après les polders (clichés Patrick Gigot, 2011, 2015) ; Côte de Nacre (C) vue sur Asnelles et (D) vue vers le sud sur le cordon littoral et marais littoral d'Asnelles (clichés Patrick Gigot, 2010 et 2014) ; falaises du Pays d'Auge depuis (E) Cricquebœuf jusqu'à Deauville et (F) vue vers l'ouest du pied de falaise au droit du cirque des Graves (clichés Olivier Maquaire, 1988 et 2001).

Figure 1.2 : Vues sur le littoral normand de la baie des Veys à la baie de Seine (clichés issus du Cerema, 2019)

Le plateau du Pays d'Auge présente un aspect disséqué et encaissé, marqué par la présence d'un profil en auge dans la vallée principale, La Touques, où les pentes sont orientées vers le nord et varient entre 2 % à 4 %. Cette vallée est marquée par la présence de nombreux vallons

rectilignes possédant des profils en « V » tel que le bassin de Ouïs ou le bassin de l'Epinay. Les versants en rive droite sont plus marqués avec des pentes moyennes d'environ 30 à 40 % en haut de versant et 10 à 20 % en bas de versant (contre 5 à 10 % en moyenne en rive gauche).

Le Pays de Caux, de l'estuaire de la Seine jusqu'à la baie de Somme (Abbeville) s'étend sur une distance d'environ 140 km. Les altitudes moyennes vont de 70 m à 110 m et le plateau s'arrête brutalement au contact de la mer pour donner naissance à des falaises crayeuses localement surmontées d'argiles à silex. Ces falaises sont régulièrement entrecoupées de vallées encaissées et vallées sèches suspendues (*i.e.* des valleuses) (Figure 1.3).

Côte d'Albâtre (A) à Etretat vue vers le nord-est (cliché Rochagneux Fotolia, 2017) ; (B) à Fécamp vue vers le sud-est (cliché Kevin Graff, 2018) ; (C) au Cap d'Ailly vue vers le nord-ouest (cliché R. Wacogne, 2016) ; (D) à Dieppe sur le port vue au sud-est (cliché Charlélie Continho, 2007) ; (E) à l'exutoire de L'Yères vue vers le nord-est (cliché Mireille Grumberg, 2017) ; (D) à l'exutoire de La Bresle vue vers le nord-est (cliché Roloff, 2009).

Figure 1.3 : Vues sur le littoral normand sur la Côte d'Albâtre (de Etretat à la baie de Somme)

Le plateau du Pays de Caux est délimité au sud par la Seine et au nord-est par la Somme. Il présente un aspect tabulaire avec des pentes moyennes d'environ 2 %. Cet aspect tabulaire est ponctuellement rompu au niveau du Cap d'Ailly, par des différences d'altitudes d'environ 30 m supplémentaires par rapport au plateau. Les nombreuses vallées du Pays de Caux présentent pour la plupart d'étroites vallées en auge avec de faibles pentes (2 % à 4 %) orientées vers le nord. Les principales vallées sont La Valmont, La Durdent, Le Dun, La Saâne, La Scie, L'Arques, L'Yères et La Bresle. Ces vallées sont, pour la plupart, fortement anthropisées à leurs exutoires avec les villes d'Étretat, Fécamp, Saint-Valéry-en-Caux, Dieppe, Le Tréport, Mers-les-Bains, etc., tandis que les vallées non urbanisées présentent un paysage de marécages ou d'estuaires, comme pour la vallée de L'Yères (marqué par la présence d'espèces halophiles).

Ces vallées littorales sont composées de nombreux de petits vallons, secs ou drainés, à fortes pentes et avec un encaissement marqué, favorables à une réponse rapide de la pluviométrie (Delahaye 2002 ; Douvinet, 2008). En parallèle, une quarantaine de valleuses, suspendues à des hauteurs variables, sont répertoriées sur le linéaire de la Côte d'Albâtre (Costa, 1997 ; Letortu, 2013). Au droit des falaises subverticales, les plages de la Côte d'Albâtre présentent des cordons de galets avec des épaisseurs et largeurs variables (Laignel, 1997 ; Quesnel, 1997 ; Costa *et al.*, 2001 ; Letortu, 2013).

1.2.1.2. Une structure en bordure de bassin sédimentaire

Les plateaux du Pays d'Auge et du Pays de Caux sont localisés à l'extrémité occidentale du Bassin parisien où des couches sédimentaires, d'environ 800 m, ont été déposées durant le Mésozoïque et le Cénozoïque ces dernières 230 millions d'années. Ces couches sédimentaires recouvrent avec discordances les terrains armoricains à l'ouest de la Normandie. La frontière entre le Bassin parisien et le Massif armoricain correspond à une limite d'érosion, car la couverture sédimentaire mésozoïque et cénozoïque a recouvert plus largement les terrains armoricains avant d'être partiellement décapée. Durant le Quaternaire, l'encaissement des cours d'eau a contribué à faire ressortir les synclinaux paléozoïques sous la couverture du Bassin parisien, dans les vallées de l'Orne, de la Laize et du Laizon (Cerema, 2019).

Le plateau du Pays d'Auge se caractérise par des séries sédimentaires globalement concordantes. Une série crétacée, recouverte d'argiles à silex, est composée de craies ainsi que de sables glauconieux. Sous cette série crétacée, les terrains jurassiques sont prédominants (Dugué *et al.,* 1998) et sont constitués de terrains marneux du Kimméridgien-Oxfordien supérieur, de calcaires gréseux de l'Oxfordien supérieur, de calcaires récifaux et oolithiques de l'Oxfordien moyen, puis de marnes de l'Oxfordien inférieur (Figure 1.4 – f, g, h, i).

De Trouville-sur-Mer à Villerville, les falaises des Roches noires se caractérisent par une abondance de gros silex noirs trouvés sur le platier rocheux ou dans les falaises verticales armées par les calcaires gréseux. Les calcaires sont davantage présents vers Trouville-sur-Mer où apparaissent d'épais bancs calcaires oolithiques et bioclastiques blanchâtres (Dugué, 2007). Ces derniers se retrouvent également dans la butte du mont Canisy, surmontés par des calcaires récifaux de l'Oxfordien moyen, dont de gros blocs éboulés sont visibles sur la plage de Blonville-sur-Mer. Ces couples de résistance s'inscrivent dans une structure monoclinale avec un pendage compris entre un et deux degrés orientés vers l'est. Le plateau est marqué par la présence d'une faille d'orientation N 110° où la couverture crétacée est érodée (Cerema, 2019).

Le plateau du Pays de Caux possède une structure géologique composée majoritairement de craies allant du Cénomanien au Campanien (Crétacé supérieur) (Figure 1.4). D'apparence simple, les différents faciès montrent des résistances et une porosité variable (Laignel, 1997, 2002 ; Laignel *et al.*, 2006 ; Letortu, 2013). Ces variations de résistance des craies sont liées aux

phénomènes de sédimentation et à la présence de *hard-grounds* engendrés par des variations bathymétriques eustatiques ou tectoniques (Juignet et Breton, 1994 ; Costa, 1997). La relative simplicité lithologique cache une complexité tectonique importante à l'origine des déformations et ondulations anticlinales et synclinales à grand rayon de courbure (Costa, 1997 ; Letortu, 2013) (Figure 1.1). Les deux principaux accidents tectoniques sont liés à l'anticlinal faillé du Bray et à la faille de la Seine (Bignot, 1987).

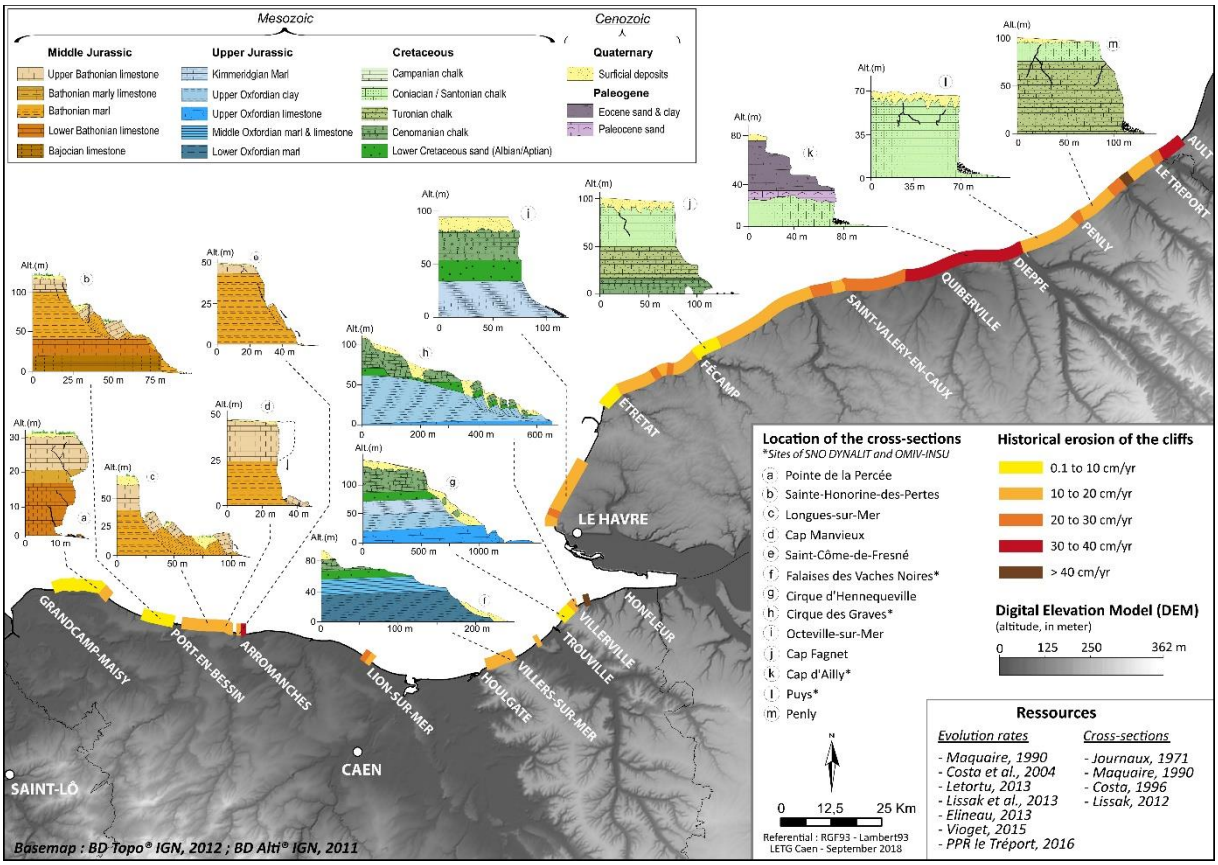


Figure 1.4 : Typologie des falaises et taux d'érosion (Costa *et al.*, 2019)

La présence du synclinal du Vexin, orienté nord-nord-ouest, permet d'expliquer l'accumulation de strates, datant du Cénozoïque, au-dessus des craies du Crétacé. Localement, la nature des substrats va influencer les taux d'évolution du recul du trait de côte. Le Cap d'Ailly, caractérisé par des terrains meubles de type sablo-argileux, fait partie des falaises de types « complexes » et comprend d'importants taux de recul (Costa, 2005) (Figure 1.4 – K). Ce type de falaise se distingue des falaises « simples » identifiables à l'est du synclinal du Vexin (Figure 1.4 – j, l, m). Ces falaises sont composées de craies du Turonien et du Coniacien, surmontées d'argiles à silex ainsi que d'une double ondulation synclinale (Criel-sur-Mer) et anticlinale (Le Tréport).

1.2.1.3. Morphologie du Pays d'Auge et du Pays de Caux

Le Pays d'Auge comprend une succession de falaises et de cordons littoraux sur environ 32 km avec trois unités morphologiques distinctes (Cerema, 2019). De Honfleur à Trouville-sur-Mer (14,2 km), l'orientation passe de N 290° (Cricquebœuf) à N 320° (Trouville-sur-Mer) pour une altitude maximale de 140 m. Le profil du plateau est en rapport avec l'épaisseur relative des assises sédimentaires qui sont affectées par un faible pendage vers le nord-est. En bordure de plateau, le profil « type » commence par un escarpement principal d'environ 30 m de commandement formé dans la craie cénomanienne. Au-delà de cet escarpement, la pente est

plus faible (15 % à 20 %) et repose sur d'épaisses formations superficielles comportant des panneaux de craies glissés (Maquaire, 1990 ; Lissak, 2012). Sur la partie littorale, le versant se termine par un escarpement vertical de 10 à 20 m taillé dans le calcaire gréseux de Hennequeville.

De Trouville-sur-Mer à Villers-sur-Mer le littoral se compose de deux dépressions alluviales, la basse vallée de La Touques et le marais de Villers-sur-Mer, terminé par deux cordons sableux sur un linéaire de 8,5 km. Entre ces dépressions se trouve une butte-témoin dénommée le Mont Canisy et occupe 1 km du linéaire pour une altitude maximale de 111 m (Figure 1.5 – cliché A et Figure 1.6). Cette falaise vive comprend un escarpement basal de 30 m entaillé dans du calcaire récifal et surmonté par un large replat en pente douce et composé de bourrelet de solifluxion. A l'est du mont Canisy, le versant est armé par les marnes de Villers (Oxfordien supérieur) et se caractérise par de faibles résistances et à un recul progressif. A l'ouest, le versant est en pente douce et le modelé chaotique est engendré par des blocs de calcaires glissés et protégeant la partie basale de l'action érosive de la mer.

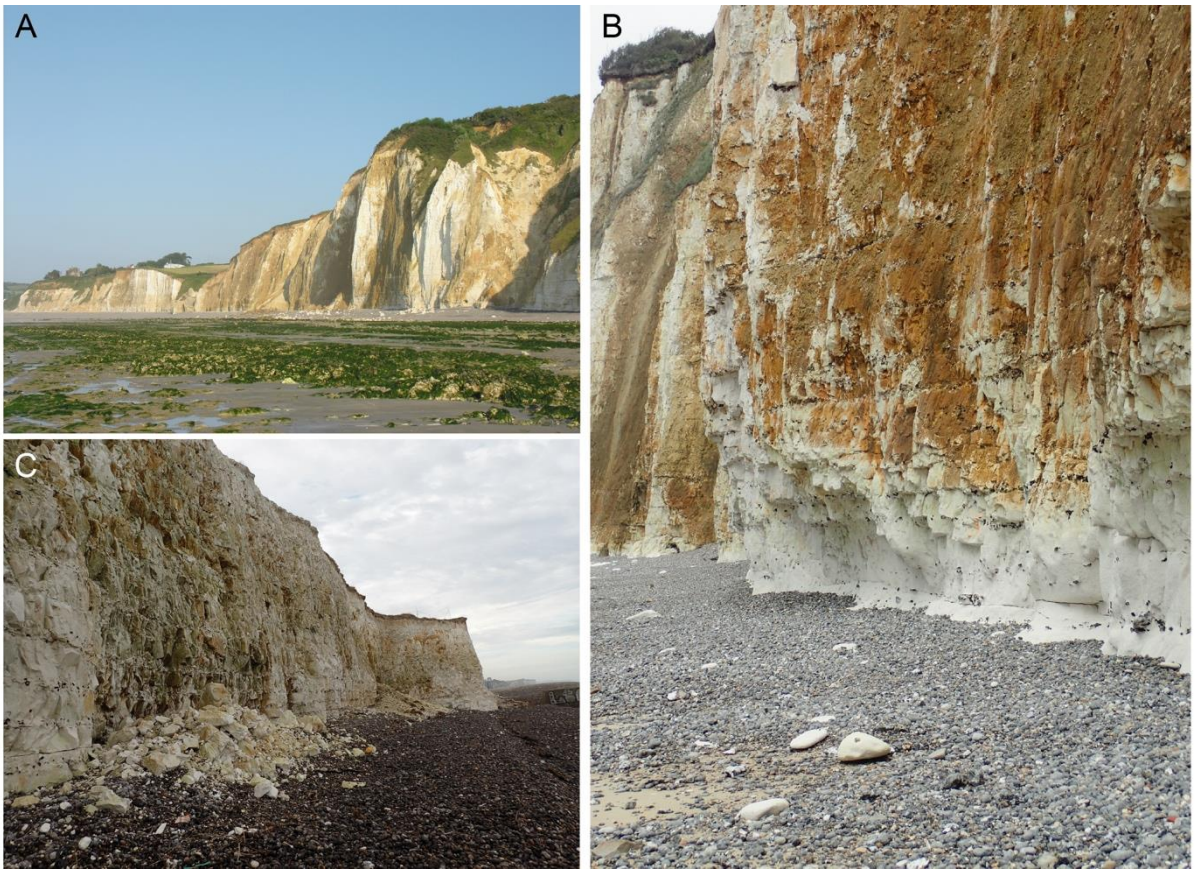
De Villers-sur-Mer à Houlgate, un plateau étroit d'environ 4,5 km (en façade littorale) délimite le Pays d'Auge au nord et à l'ouest pour des altitudes allant de 60 à 120 m. Les falaises des Vaches Noires (Figure 1.5 – cliché B) sont entaillées dans des argiles jurassiques sur lequel s'opère de complexes mouvements gravitaires et coulées boueuses pouvant détacher ponctuellement d'importants blocs de calcaire (Roulland *et al.,* 2019).

Figure 1.5 : Falaises (A) du mont Canisy à Benerville-sur Mer et (B) des Vaches Noires à l'ouest de Villers-sur-Mer (clichés O. Maquaire, 2017 *in* Cerema, 2019)

Sur le plateau du Pays de Caux, du cap d'Antifer jusqu'à la baie de Somme, les falaises de la Côte d'Albâtre, d'une centaine de mètres de hauteur, sont influencées par la combinaison d'une série de phénomènes météo-climatiques, marins et anthropiques où les influences directes ou indirectes restent difficiles à estimer (Costa, 1997). Il est à préciser que sur ces falaises, la phase de préparation de glissement (ou décrochement) de la paroi n'est pas systématiquement synchrone avec le déclenchement même du glissement et la côte peut reculer soudainement jusqu'à plusieurs semaines plus tard (Letortu *et al.*, 2019).

La craie poreuse des falaises influence directement la résistance de la structure et est particulièrement sensible aux précipitations ainsi qu'à l'alternance gel/dégel (Hénaff *et al.*, 2002 ; Costa *et al.*, 2003 ; Letortu, 2013). En parallèle, la base des falaises subit une érosion mécanique continuelle par les marées et les vagues (Nesteroff et Mélières, 1967 ; Rodet, 1983 ; Michoud *et al.*, 2015 ; Letortu *et al.*, 2019). Si cette érosion est partiellement freinée par le cordon de galets (issus de l'érosion des falaises), mettant le pied de falaise hors d'atteinte des vagues, les épis, perrés et jetées, vont partiellement bloquer le transit sédimentaire au niveau des plages

et engendrer des déficits (crises) sédimentaires aggravant le processus d'érosion des falaises par la mer (Costa, 1997 ; Costa et Delahaye, 2002 ; Costa *et al.*, 2004).



(A) Vue large des falaises vives de Dieppe au Cap d'Ailly (cliché O. Maquaire, août 2013) ; (B) falaises à l'est du Cap d'Ailly : encoche basale d'érosion et cordon de galet (cliché O. Maquaire, octobre 2016) ; (C) falaises à Saint-Marguerite-sur-Mer : blocs de tailles diverses accumulés en pied de falaise et sur le cordon de galets dans un secteur très fracturé (cliché O. Maquaire, novembre 2018).

Figure 1.6 : Clichés des falaises vives et crayeuse du Pays de Caux depuis la plage

En arrière littoral du Pays de Caux, les formations superficielles (argiles à silex) sont naturellement à l'équilibre avec le paysage. Cet équilibre traduit une certaine stabilité des terrains (Equilbey *et al.*, 2002). Cependant, l'étalement urbain tend à rendre les formations superficielles instables. Durant des épisodes pluvieux et de fortes intensités, des glissements peuvent ponctuellement survenir dans les secteurs à fortes pentes. Cependant, à l'heure actuelle, aucune analyse ou spatialisation des glissements de terrain n'a été produite en arrière littoral dans le Pays de Caux.

1.2.2. Contexte météo climatique

Le littoral a la particularité d'être affecté par des facteurs climatiques, hydrologiques et hydrodynamiques (Cerema, 2019). Aussi bien en façade littorale qu'en arrière littoral, le vent, les précipitations, les vagues, le niveau marin ou les courants associés sont autant d'éléments responsables des phénomènes gravitaires (e.g. glissements de terrain, effondrements, éboulements, etc.) et hydrogravitaires (e.g inondations, submersions marines, crues turbides, etc.). La présentation des connaissances sur le contexte climatique est donc fondamentale si l'on souhaite appréhender, dans leur globalité, les différentes dynamiques gravitaires et

hydrogravitaires dans des environnements côtiers et à falaises (Crozier, 1999 ; Glade *et al.*, 2000 ; de Brito and Evers, 2016 ; Confuorto *et al.*, 2017).

La présentation du contexte météo-climatique à l'échelle régionale sera abordée en trois points. La section 1.2.2.1 retrace les caractéristiques climatiques de la Normandie en termes de précipitations et de températures. La section 1.2.2.2 décrit l'exposition du littoral normand par rapport aux flux d'ouest (ayant une incidence majeure durant les événements de tempête). La section 1.2.2.3 présente la saisonnalité des précipitations et des températures. Pour terminer, la section 1.2.2.4 décrit les évolutions à moyen et long terme des changements climatiques en termes de précipitations et d'élévation du niveau marin en Normandie et dans la mer de la Manche.

1.2.2.1. Une région humide marquée par les influences océaniques

Bénéficiant d'un climat océanique tempéré dû à l'influence des masses d'air venant de l'Atlantique, la Normandie bénéficie de précipitations toute l'année ainsi que de faibles amplitudes thermiques (DREAL Normandie, 2019). Le Pays de Caux bénéficie d'un climat maritime tandis que le Pays d'Auge est sous un climat contrasté des collines. Pour l'ensemble de la frange littorale (~10 km), les vents sont plus forts que dans la partie continentale (DREAL Normandie, 2019). Ainsi, le littoral est moins exposé au gel (ou à la chaleur) et les précipitations sont moins fréquentes et de plus faibles intensités.

Le Cotentin, à l'ouest de la Normandie, fait office de façade de protection aux flux d'ouest provenant de l'Atlantique (Cantat et Brunet, 2001). Le Cotentin est donc plus humide (cumul annuel des précipitations > 1000 mm par an) en se prolongeant et s'effaçant progressivement vers l'est (Figure 1.7). À l'Est, la plaine de Caen est partiellement protégée et présente des cumuls annuels de précipitations d'environ 800 mm et des températures douces en hiver et fraîches en été. En raison de sa topographie contrastée, le Pays d'Auge est plus humide (cumul d'environ 900 mm annuel) et présente des amplitudes thermiques plus contrastées avec des hivers plus froids et des étés plus chauds. Le Pays de Caux est moins protégé des flux d'ouest et présente des cumuls annuels de précipitations compris entre 900 et 1 000 mm avec des températures plus fraîches que sur le reste de la Normandie (DREAL Normandie, 2019). Pour l'ensemble de la région, les précipitations s'étalent sur une moyenne de 130 jours par an avec une période hivernale plus humide.

Malgré son exposition aux flux d'Atlantique, la région peut subir d'importantes variations de températures et de précipitations, avec des périodes propices aux inondations (1995, 2001, 2018, etc.), des périodes de sécheresse majeures (1976, 1996, etc.) et également des épisodes orageux significatifs propices aux crues turbides (Trzpit, 1970 ; Cantat et Brunet, 2001 ; Delahaye, 2008 ; Lissak, 2013 ; Douvinet *et al.*, 2015).

Occasionnellement, les bassins versants littoraux vont subir localement des événements météorologiques (orages) d'une forte intensité. Les sous-bassins affluents aux grands bassins littoraux (La Touques, L'Arques, etc.), étant secs ou ayant de faibles débits la majeure partie de l'année, vont fonctionner sous forme de crues turbides ou de ruissellements concentrés (selon le mode d'occupation des sols) durant un court laps de temps. Différentes conditions nécessitent d'être remplies afin que ces sous-bassins puissent fonctionner (Delahaye, 2003 ; Douvinet, 2008 ; Douvinet et al., 2015) :

(1) En *période hivernale* : au moins 90 mm de pluie doivent s'accumuler sur une période de 10 jours et se finissant par un événement pluvieux d'au moins 15 mm ;

(2) En *période printanière/estivale* : 70 mm de précipitations doivent s'accumuler sur un même bassin en une journée.

Ces phénomènes hydrologiques vont principalement affecter les aménagements localisés en aval des fonds de vallées ainsi que dans les vallées littorales.

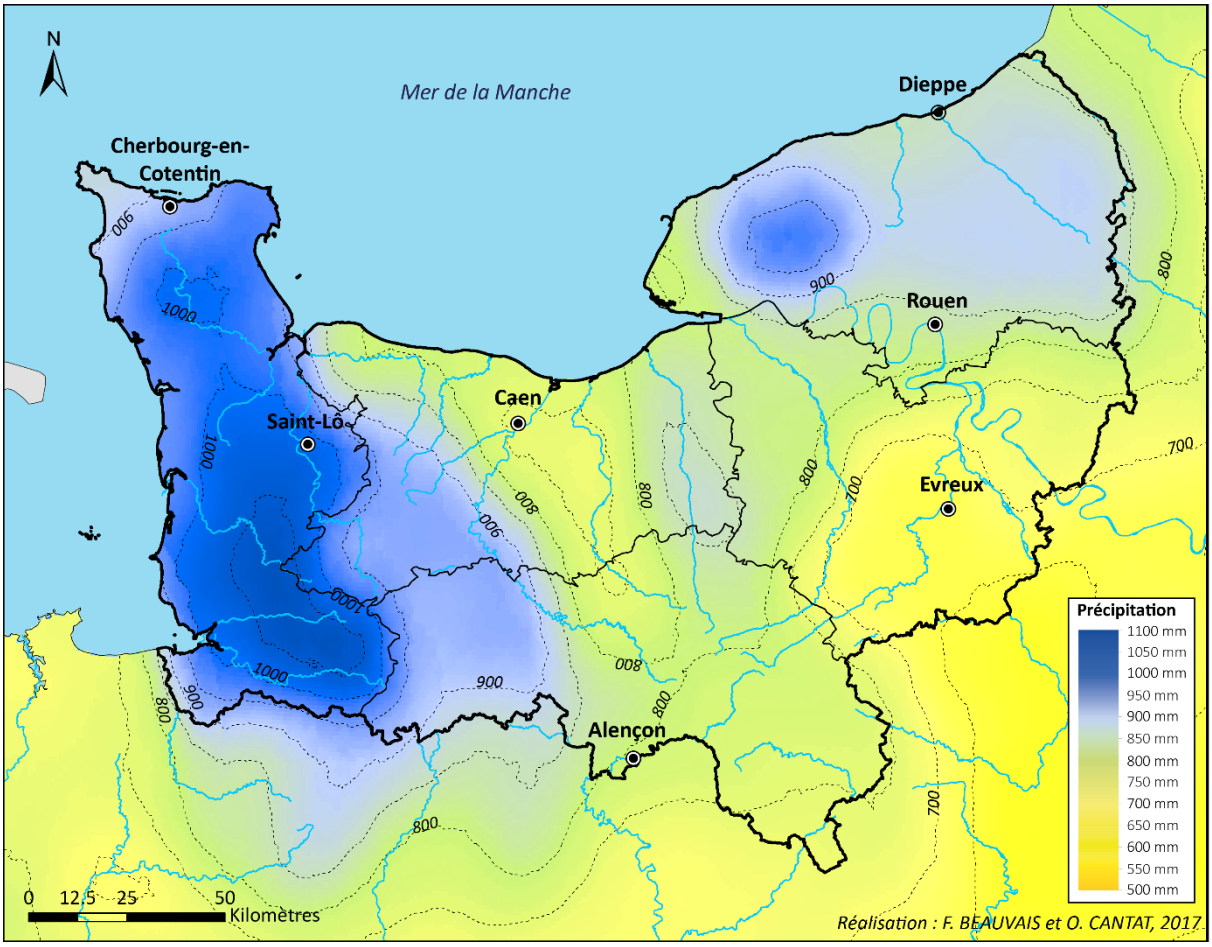


Figure 1.7 : Cumul annuel des précipitations sur la région Normandie (réalisation : Beauvais et Cantat, 2017 dans DREAL Normandie, 2019)

1.2.2.2. Exposition des côtes aux flux d'ouest

De par leurs positions, les côtes nord-ouest du Cotentin sont très exposées aux flux d'ouest et enregistrent 140 jours de vents forts (8,5 à 12,5 $m^3 s^{-1}$) par an. Partiellement protégées de ces flux d'ouest, la Côte du Bessin, la Côte de Nacre et la Côte Fleurie sont moins exposées aux fortes rafales de vent (Figure 1.8).

La Côte Fleurie bénéficie d'un effet de site en raison de l'orientation de sa côte, vers l'ouest et le nord-ouest, influençant l'exposition aux vents et donc à la houle (e.g. durant la tempête Eleanor des 3 et 4 janvier 2018, la Côte Fleurie a été la côte la plus impactée en Normandie – ROL, 2018). La façade littorale du Pays de Caux est exposée à des vents violents (seulement 3,9 % de vent calme annuel) avec des vitesses moyennes de 5,2 $m.s^{-1}$ pour une direction dominante d'ouest de novembre à février, période où les tempêtes « majeures » se sont produites.

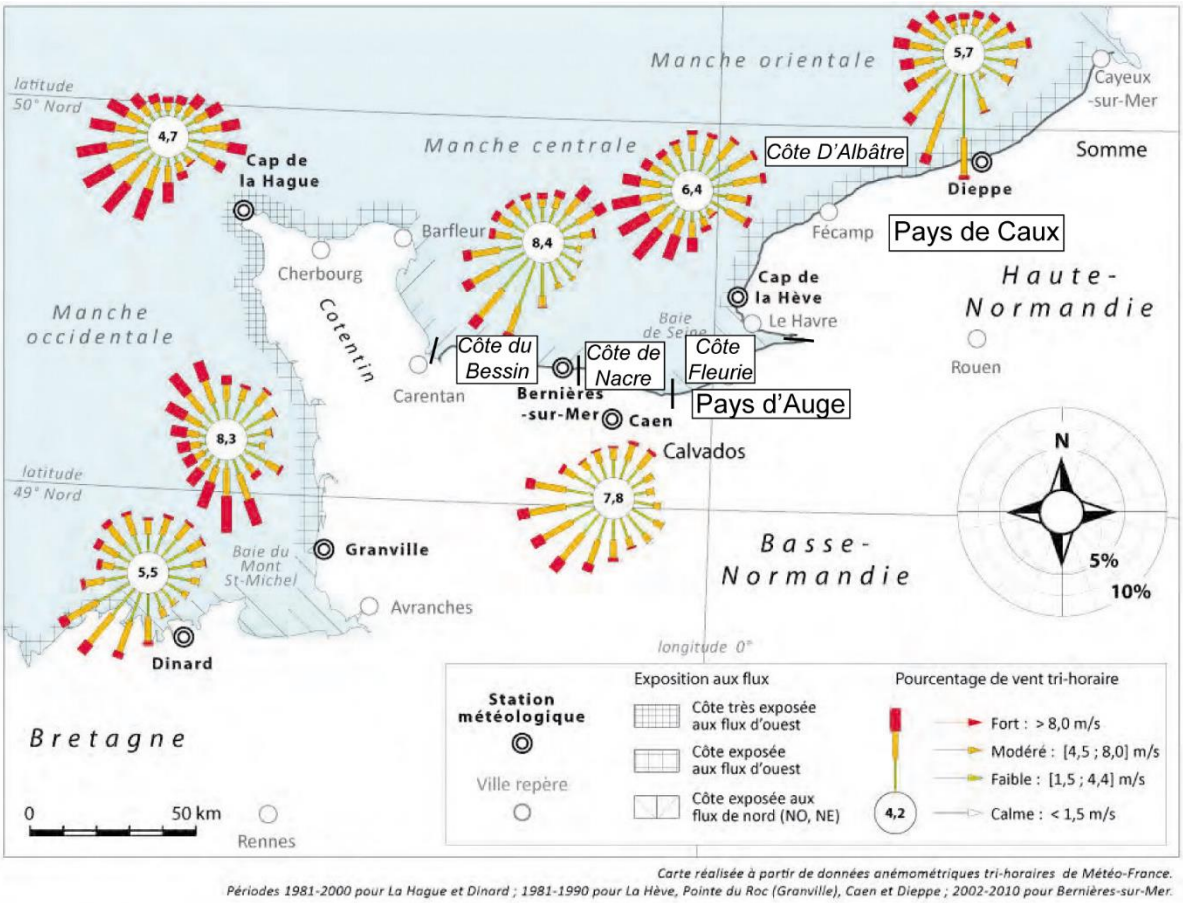


Figure 1.8 : Exposition et direction des vents trihoraires sur la période 1981 – 2010 sur les côtes normandes (*in* Letortu, 2012)

La région est marquée par une double saisonnalité du vent (DREAL Normandie, 2015, 2019). En période hivernale, les vents sont forts sur une période 10 à 15 jours par mois pour les côtes les plus exposées. En partie continentale, plus abritée, la période s'étend de 3 à 6 jours par mois. En période estivale (juin à septembre), les vents sont plus calmes avec une fréquence de vents forts de 2 à 4 jours par mois en moyenne sur la façade littorale du Calvados et du Pays de Caux. Entre 1950 et 2017, les distributions n'indiquent pas de tendance d'évolution d'exposition au vent sur les côtes. Si la période la moins venteuse s'étend de 1960 à 1970, la période entre 1990 et 2000 se caractérise par des vents particulièrement forts, engendrant des tempêtes et des submersions marines sur l'ensemble du littoral normand (DREAL Normandie, 2019). Depuis cette décennie, les périodes de tempêtes sont moins fréquentes.

1.2.2.3. Variabilité saisonnière des températures et précipitations

Au regard des tendances depuis 1981, la période humide s'étend d'octobre à décembre avec des moyennes mensuelles des précipitations supérieures à 80 mm et un gradient thermique passant de 15°C à ~5°C entre ces trois mois. En raison de sa proximité au littoral, la station de Dieppe (Pays de Caux) reçoit moins de précipitations que la station de Saint-Gatien-des-Bois (Pays d'Auge) (Figure 1.9). Durant cette période, la station de Saint-Gatien-des-Bois peut enregistrer jusqu'à 29 jours de précipitations par mois (Lissak, 2012). Entre janvier et juin, les précipitations sont relativement homogènes avec les mois de janvier, mai et juin plus humides. La période estivale, d'août à septembre, est plus sèche notamment en façade littorale.

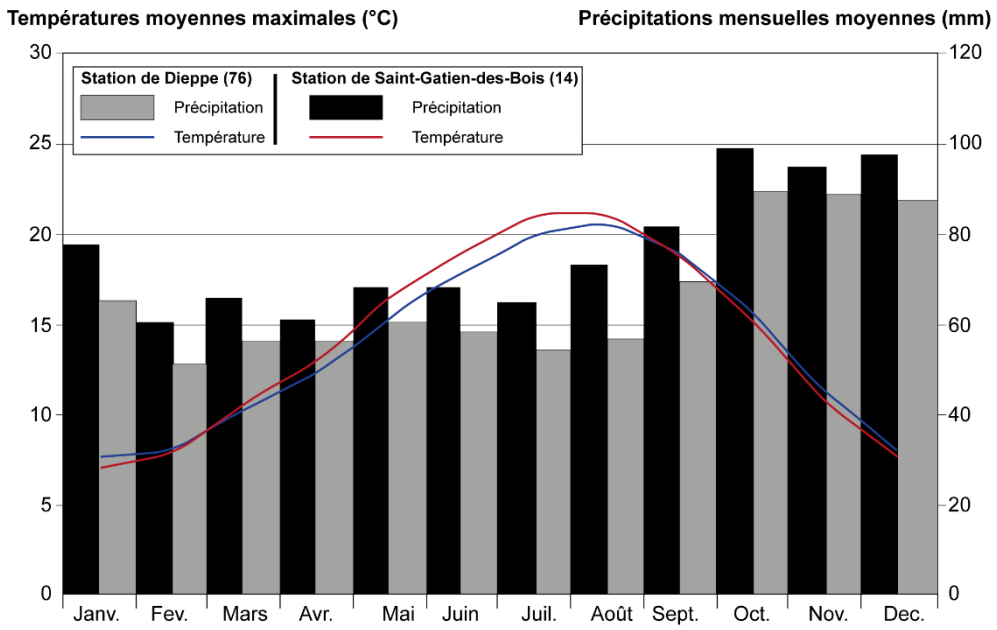


Figure 1.9 : Normales des températures et des précipitations sur la période 1981 – 2010 sur la station de Dieppe (76) et de Saint-Gatien-des-Bois (14) (données : Météo France)

Sur la station de Dieppe, des événements météo climatiques extrêmes ont donné lieu à des enregistrements de températures allant jusqu'à -15 C et des précipitations journalières supérieures à 55 mm (Letortu, 2013). En moyenne, sur un tiers de l'année, la station enregistre un cumul de sept jours de pluie, le plus souvent en période hivernale. Les cellules orageuses, du fait de leur action plus localisée (sur les vallons secs/drainés), se produisent durant la période printanière et estivale et restent difficiles à prédire.

1.2.3. Contexte hydrologique

En lien avec les conditions météo-climatiques, les bassins versants normands sont affectés par différents types d'inondations provenant des rivières littorales ou des petits vallons (secs ou humides). Soumis à un régime hydrologique simple de type pluvial océanique, les bassins littoraux (La Touques, Le Dun, La Saâne, La Scie, L'Arques, L'Yères et La Bresle) subissent des inondations, plus ou moins marquées, en période hivernale (DDTM, 2016). Des crises hydrologiques (concentration du ruissellement et/ou crues turbides) peuvent également se produire soit en période hivernale, en lien avec des phénomènes de battance des sols, soit en période printanière/estivale, en lien avec des épisodes orageux intenses et de saturation (hortonien) des sols (Delahaye, 2002 ; Douvinet, 2008 ; Viel, 2012 ; Landemaine, 2016). La particularité des bassins littoraux normands est qu'ils sont influencés par l'hydrodynamisme marin en Manche. Bien qu'elles soient mentionnées, ces interactions restent cependant peu étudiées (ce qui fera l'objet des chapitres 4 et 5), mais certains rapports mentionnent des variations de la lame d'eau en lien avec des coefficients de marée importants (DEFRA, 2002, 2003, 2005 ; Batstone *et al.*, 2013 ; Fisson *et al.*, 2014 ; Fisson et Lemoine, 2016).

La section 1.2.3.1 présente les caractéristiques morphologiques et hydrologiques des bassins versants littoraux compris au sein des sites. La section 1.2.3.2 propose une typologie des bassins versants en fonction de leurs caractéristiques hydromorphologiques.

1.2.3.1. Caractéristiques des bassins versants côtiers en contexte de falaise

Deux principaux phénomènes hydrologiques se produisent dans les bassins littoraux en Normandie : (1) les crues turbides et/ou concentrations du ruissellement se formant dans les sous-bassins versants et (2) les débordements de cours d'eau lents. Les inondations par débordement de cours d'eau sont majoritairement liées à une saturation de la plaine alluviale et, à une moindre mesure, à des phénomènes de ruissellement ou d'apport par les sous-bassins versants (Brown, 1992 ; Viel, 2012).

Les différentes définitions utilisées pour la présentation du contexte hydrologique, ainsi que lors des analyses menées aux chapitre 4 et chapitre 5 sont présentées ci-après afin de clarifier les nuances pouvant exister dans la terminologie des basses vallées littorales (Figure 1.10).

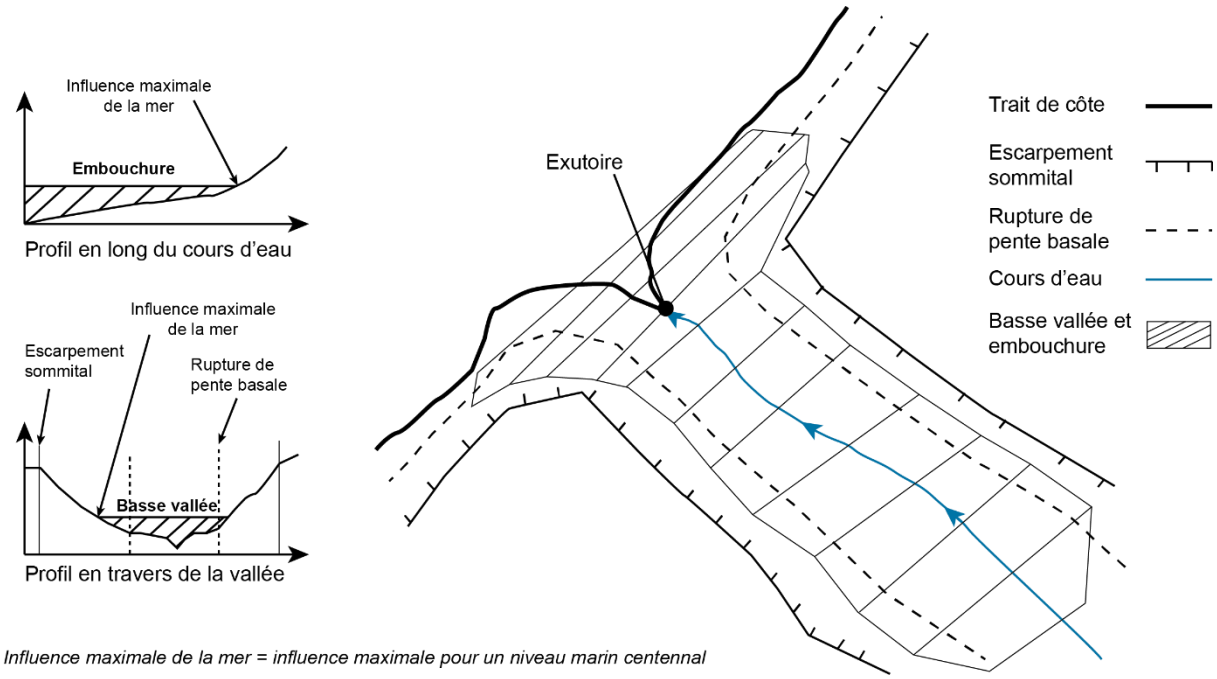


Figure 1.10 : Définition des termes utilisés dans la morphologie des vallées littorales en Normandie

Une **embouchure** se définit comme un estuaire ou un delta (Baud *et al.*, 2008) : « *Un estuaire est donc un milieu ouvert dans lequel se fait sentir la marée. Celle-ci remonte le cours d'eau parfois sur de nombreux kilomètres* ». L'embouchure recouvre une dimension hydrologique comprenant un mélange d'eau marine et continentale. Si ces embouchures sont facilement identifiables pour des fleuves tels que la Seine ou la Gironde, la différence entre embouchure (zone estuarienne) et **basse vallée** littorale est beaucoup plus ténue et difficile à distinguer dans les vallées littorales normandes. Dans la suite de cette thèse, nous utiliserons le terme embouchure dans le cas d'une analyse du linéaire du cours d'eau depuis l'exutoire jusqu'au point d'influence maximale de la mer (*cf.* chapitre 4) et nous utiliserons le terme basse vallée pour décrire un secteur soumis à une influence marine et fluviale (*cf.* chapitre 5).

Le phénomène de concentration du ruissellement, pouvant engendrer (ou non) des crues turbides selon les modes d'occupation des sols, se produit principalement dans les sous-bassins (vallons secs et/ou drainés). La concentration de ce ruissellement va être influencée par la morphologie des vallons en association avec leur structure géologique (bassins à pente forte, en rebord de plateau et sur les fronts de cuesta). Ce phénomène est accentué par l'occupation des sols, nus ou cultivés, propice à l'érosion et transport sédimentaire par le ruissellement

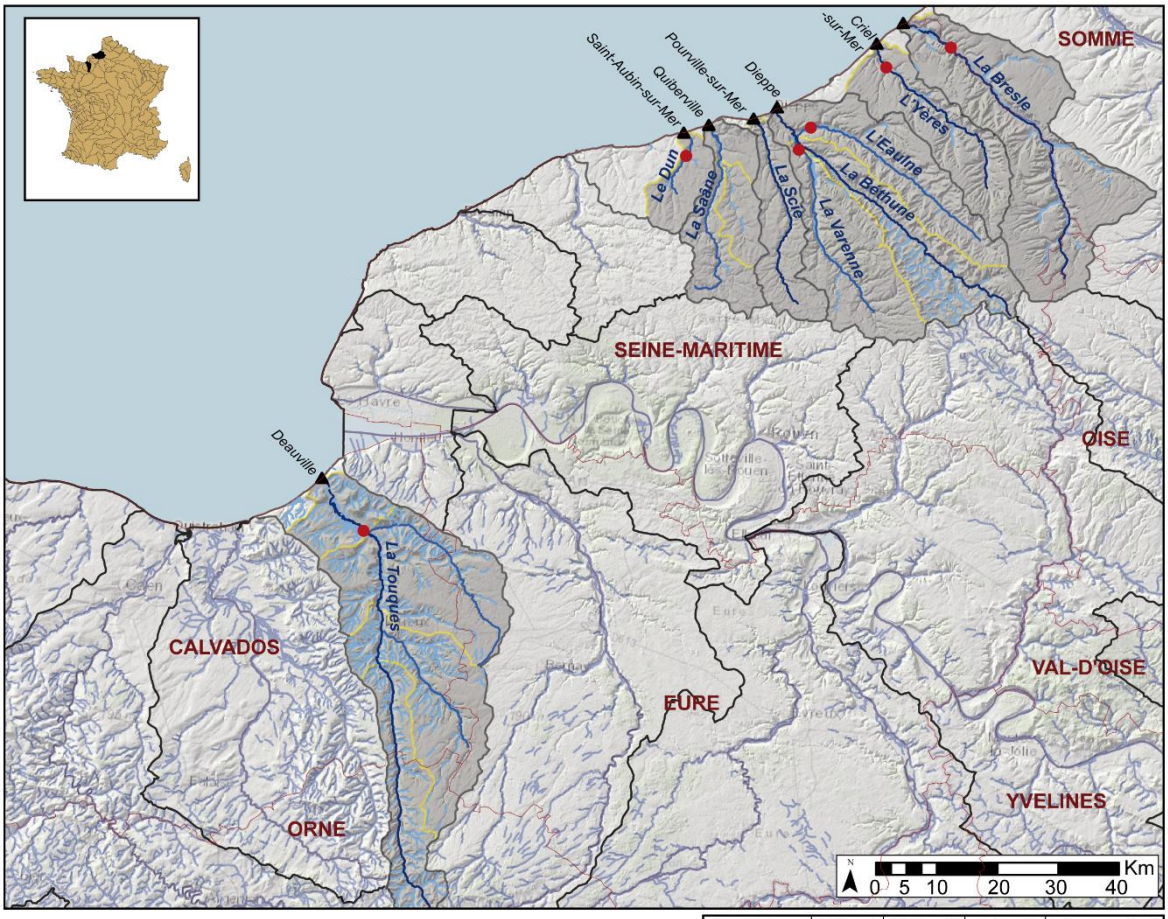
(Delahaye *et al.*, 2001 ; Douvinet, 2008 ; Douvinet *et al.*, 2015). Ces phénomènes de crues turbides restent cependant très localisés et contribuent faiblement (1 à 2 %) à la balance hydrologique annuelle des bassins (Landemaine, 2016). Par conséquent, à moins d'un événement majeur, les crues turbides et débordements dans les fonds de vallées, restent deux phénomènes dissociés.

Les inondations dans les vallées littorales sont principalement liées à des débordements de cours d'eau lents pouvant durer sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines. En raison de leur régime pluvial océanique, les pics de crues et de plus hautes lames d'eau surviennent généralement en période hivernale. La seule possibilité pour que le bassin puisse se vidanger en cas de débordement est de pouvoir se déverser dans la mer. En cas de concomitance avec un événement de tempête (survenant généralement en hiver), et couplé à de hauts niveaux marins, le cours d'eau va se retrouver dans une situation où les écoulements seront au moins partiellement bloqués à son embouchure. Ce phénomène de blocage reste la plupart du temps observé, mais non quantifié et il devient nécessaire de s'interroger, dans un contexte d'élévation du niveau marin en Manche (cf. section 1.2.2), sur l'impact d'un effet de blocage des écoulements, sur le littoral et en arrière littoral, durant un débordement de cours d'eau (Fisson et Lemoine, 2016).

Ces effets de blocage des écoulements peuvent être illustrés par une archive de l'INA (2012) sur les inondations en Seine-Maritime durant les tempêtes Lothar et Martin le 25 et 27 décembre 1999 (Le Havre et Dieppe inondés) : « […] *ce qui joue contre nous ce sont les grosses marées […] du fait de ces grosses marées, la buse (du port de Dieppe où circule l'Arques) n'a pas un débit comme d'habitude. […] L'eau accumulée derrière nous (vallée de l'Arques) a du mal à partir puisque le phénomène des grosses marées retient justement ce débit.* » (Reportage disponible sur http://www.ina.fr).

Afin de mieux comprendre ces effets de blocage des écoulements (engendré par une concomitance), il convient dans un premier temps d'analyser le comportement « normal » des bassins versants côtiers pour ensuite en déduire un comportement exceptionnel en période de débordement potentiellement lié à un blocage des écoulements par la mer. Cette première description servira notamment aux analyses statistiques (chapitre 4) et à la modélisation spatiale des effets de concomitance (chapitre 5). Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps à l'analyse morphologique des bassins localisés au sein des sites d'étude (*cf.* section 1.3) puis dans un second temps à leur comportement hydrologique.

Les bassins côtiers à l'intersection des sites d'étude présentent des pentes moyennes faibles (> 0,4 %) pour des superficies allant de 100 km² (Le Dun) à plus de 1 000 km² pour les plus grands bassins (La Touques, L'Arques) (Figure 1.11).



Limites départementales
Bassin versant
Sous bassin versant (sites d'étude)
Cours d'eau
Station hydrologique
Exutoire des bassins versants (zone d'étude)

Bassins	P (km)	S (km²)	L (km)	Alt. max (m)
La Touques	392	1279	108	205
Le Dun	48	109	13	52
La Saâne	161	300	40	134
La Scie	95	221	38	139
L'Arques	342	1034	67	149
L'Yères	103	310	40	125
La Bresle	163	762	68	162

P est le périmètre des bassins / S est la surface des bassins
L est la longueur du tronçon principal / Alt. max est l'altitude maximale du cours d'eau

Figure 1.11 : Caractéristiques des bassins versants localisés sur les sites d'étude

D'une superficie d'environ 1 280 km², la vallée de La Touques présente des pentes moyennes d'environ 2 % en amont du bassin jusqu'à Pont-L'Évêque. Entre Pont-l'Évêque et l'exutoire à Deauville et Trouville-sur-Mer (environ 11 km à vol d'oiseau et 13 km en longeant le cours d'eau) appelé basse vallée de La Touques, les pentes sont très faibles (> 1 %). La basse vallée de La Touques possède une importante plaine inondable d'environ 1,5 km de large qui correspond à une espace de stockage pour les débordements du cours d'eau (Figure 1.12). À environ 1 km de l'exutoire, le cours d'eau est entièrement artificialisé et chenalisé afin de limiter les débordements. Le mont Canisy (Figure 1.12 – A) marque la séparation entre l'embouchure actuelle de La Touques et le marais littoral de Villers-sur-Mer.

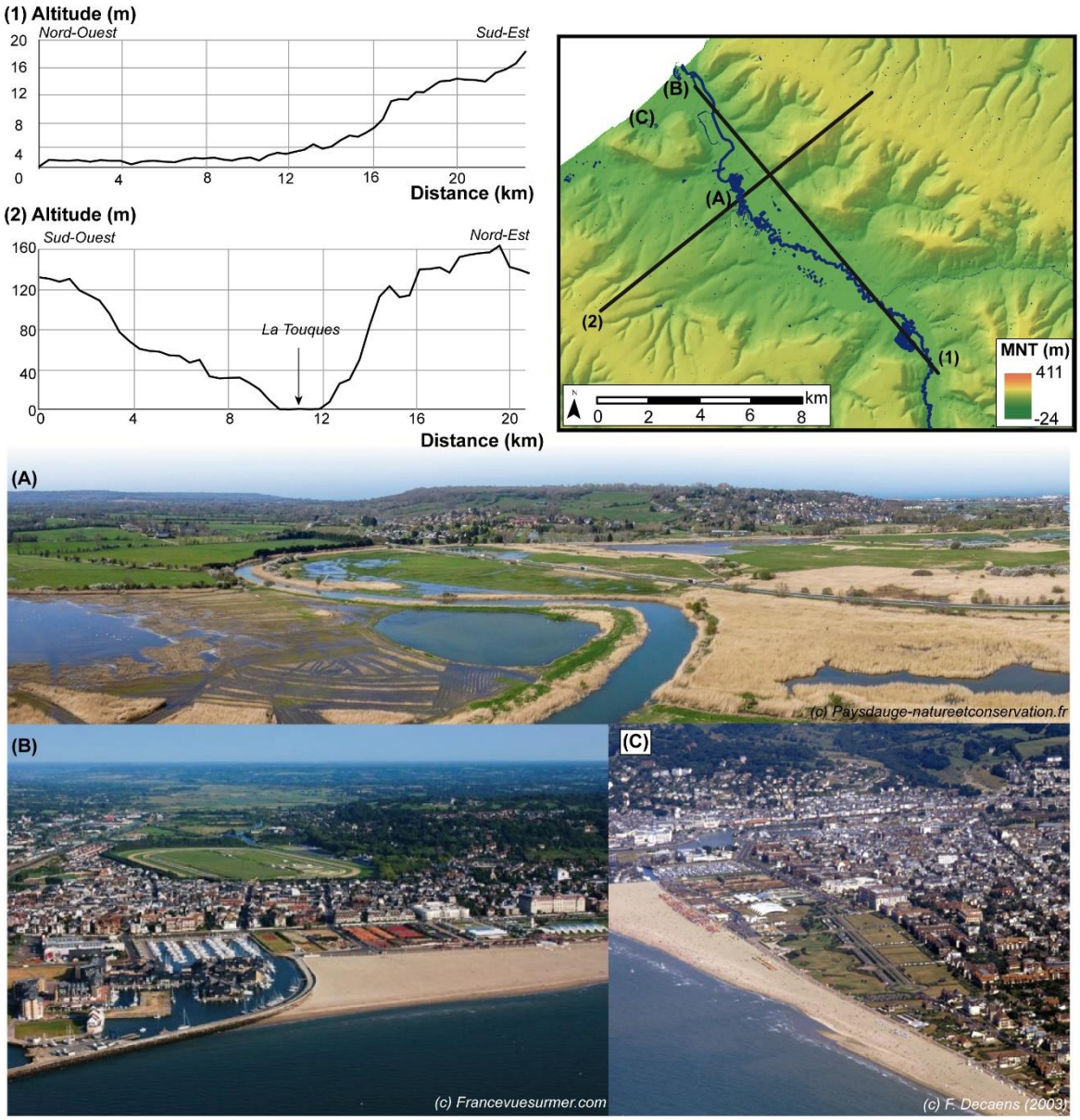


Figure 1.12 : Profil en long et en travers de la vallée de La Touques et principaux paysages à l'exutoire du bassin versant : (A) vue sur le mont Canisy depuis le sud-est, (B) vue sur Deauville depuis le nord et (C) depuis l'ouest

Dans le Pays de Caux, les vallées littorales sont plus étroites et encaissées que dans le Pays d'Auge. Malgré des superficies différentes, allant de 109 km² pour la vallée Du Dun à 1 034 km² pour la vallée de L'Arques, les vallées présentent des morphologies assez similaires, mais des systèmes de contrôle des flux très différents selon la densité des aménagements. Ainsi ces quatre basses vallées possèdent une plaine alluviale d'une largeur allant de 250 m (Le Dun) à 900 m pour L'Arques. Les basses vallées littorales s'étendent sur environ 2 km (sur Le Dun et La Scie) à 5 km (sur L'Arques). Les pentes sont très faibles dans les basses vallées (> 1 %) et passent à environ 1 – 2 % dans les hautes vallées.

Les vallées du Dun, de La Saâne et de La Scie possèdent des digues de protection contre la mer à leur embouchure (Figure 1.13). Sur ces digues de protection, deux conduits (section de 1 × 1 m) ont été aménagés pour permettre au cours d'eau de rejoindre la mer. Sur la vallée de L'Arques, un système de clapet permet de contrôler le niveau d'eau dans le port (Figure 1.13 – A).

Lorsqu'un niveau de pleine mer est atteint, ce clapet se ferme et prive temporairement L'Arques d'un exutoire. La plaine alluviale a été aménagée en amont de Dieppe (sur L'Arques), pour réguler ces flux durant le blocage. Cependant ces aménagements ont été réalisés pour résister à un niveau marin cinquantennal à centennal. Dans le cas d'une élévation du niveau marin centennal à l'horizon 2100 (+ 1 m d'élévation du niveau marin), il devient important de s'interroger sur les futurs effets de blocage ainsi que sur le risque de débordement dans les zones actuellement aménagées.

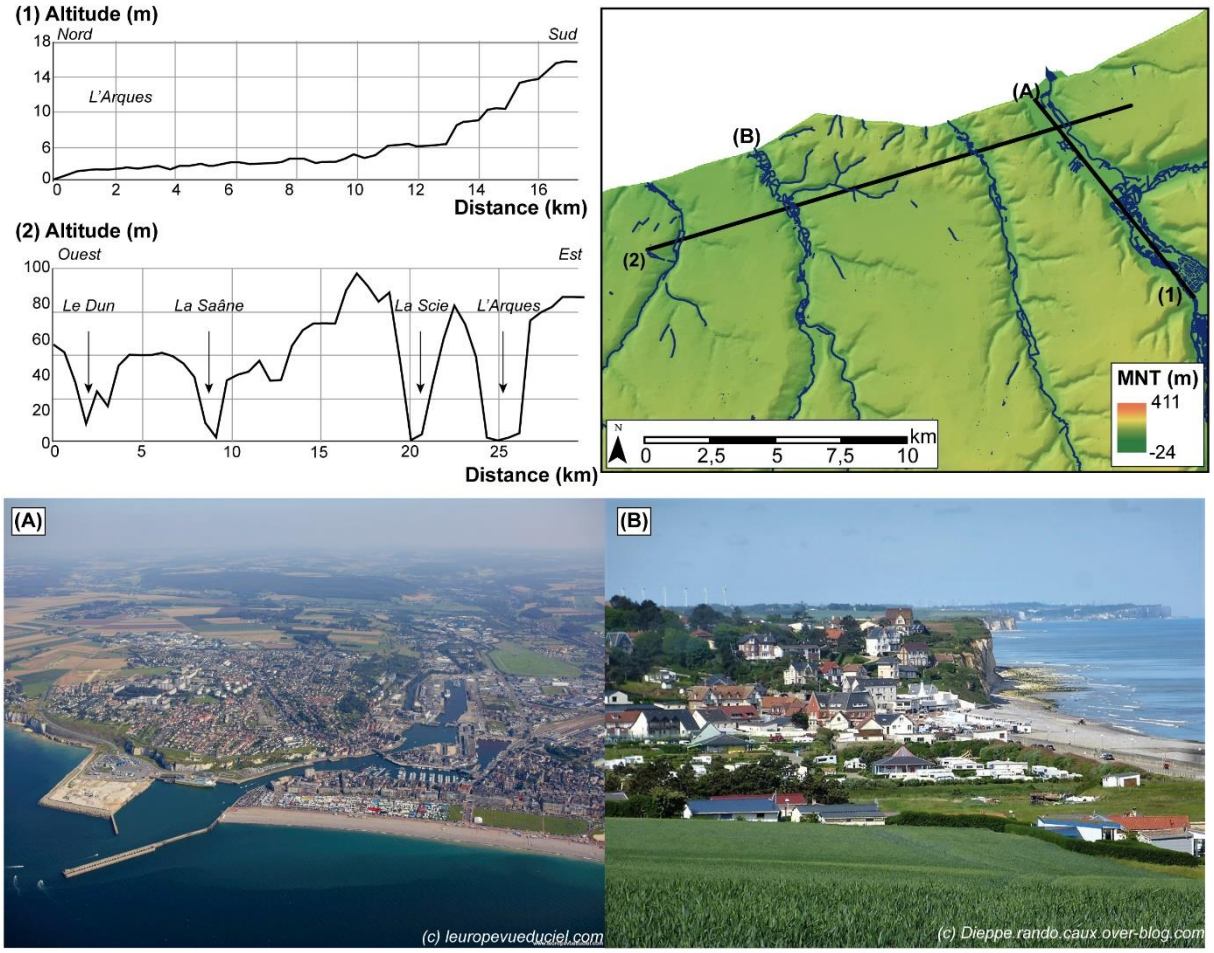


Figure 1.13 : Profil en long et en travers des vallées Du Dun, de La Saâne, de La Scie et de L'Arques et principaux paysages à l'exutoire de ces bassins versants : (A) vue sur Dieppe depuis le nord et (B) vue à Quiberville depuis l'est

L'Yères et de La Bresle sont deux vallées étroites particulièrement exposées aux flux d'ouest en raison de la position des bassins à l'embouchure (orienté au Nord-Est). D'une superficie de 310 km², la vallée de L'Yères a une largeur de sa plaine alluviale à son exutoire de 475 m (Figure 1.14 – A). Sa basse vallée s'étend sur une longueur d'environ 2,5 km jusqu'à Criel-sur-Mer avec des pentes très faibles (> 1 %). Cette basse vallée est considérée comme un estuaire en raison de la présence d'espèces halophiles. Comme pour les vallées du Dun, de La Saâne et de La Scie, la vallée de L'Yères possède une digue de protection à la mer comprenant deux conduits (section mouillée non renseignée) pour laisser le cours d'eau s'écouler jusqu'à la mer.

La vallée de La Bresle (762 km²) est similaire à la vallée de L'Arques. Sa basse vallée s'étend sur une distance de 4,5 km (jusqu'à Eu) pour des pentes très faibles (> 1 %). Un système de clapet de régulation permet de contrôler l'écoulement de La Bresle dans le bassin portuaire (Le Tréport et Mers-les-Bains). En cas de niveau de pleine mer, ce clapet se ferme privant

temporairement La Bresle d'un exutoire. Un canal a été construit en rive gauche de La Bresle, l'ancien Canal de Penthièvre, afin que l'eau puisse s'accumuler en attendant que le niveau marin baisse.

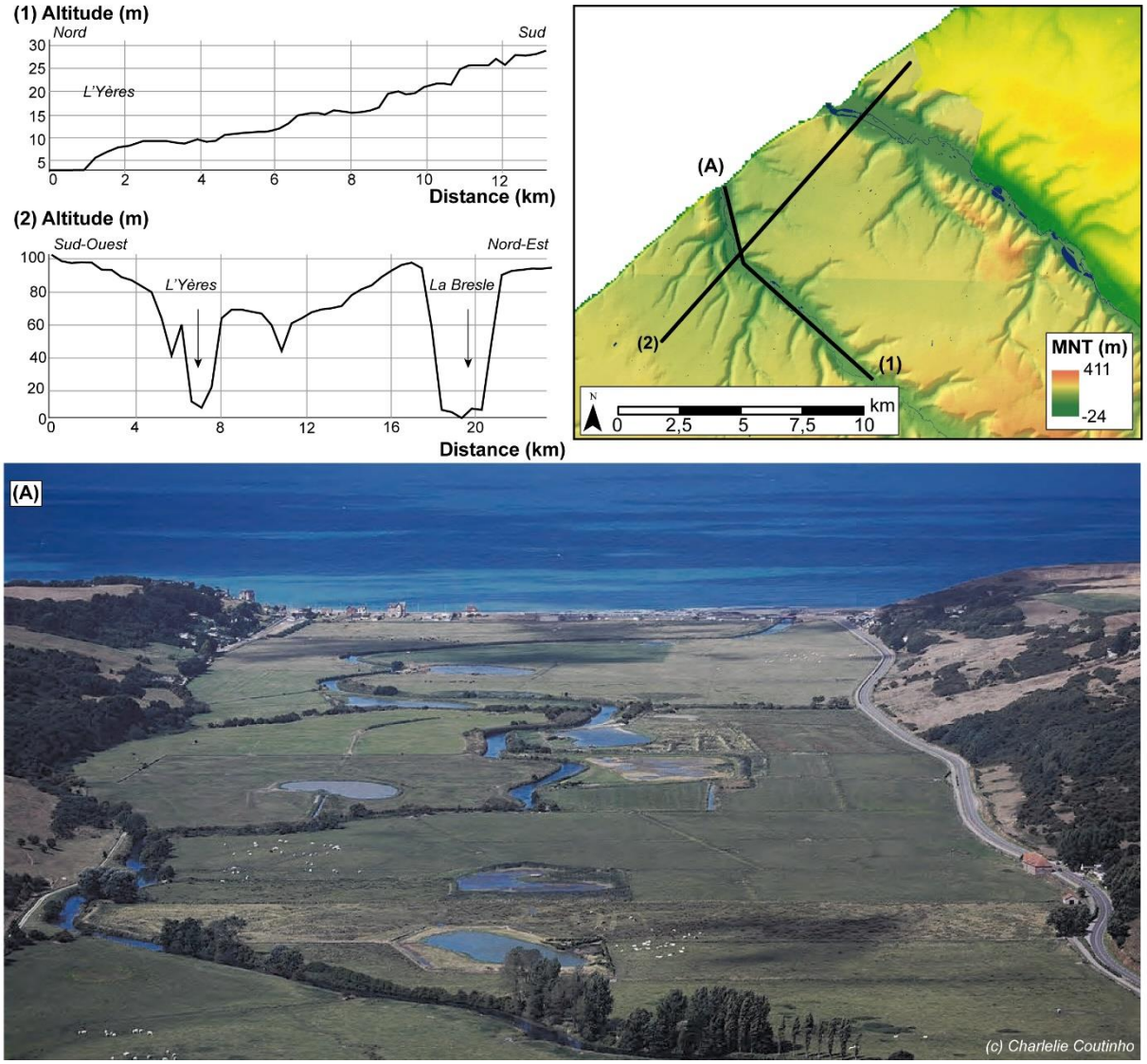
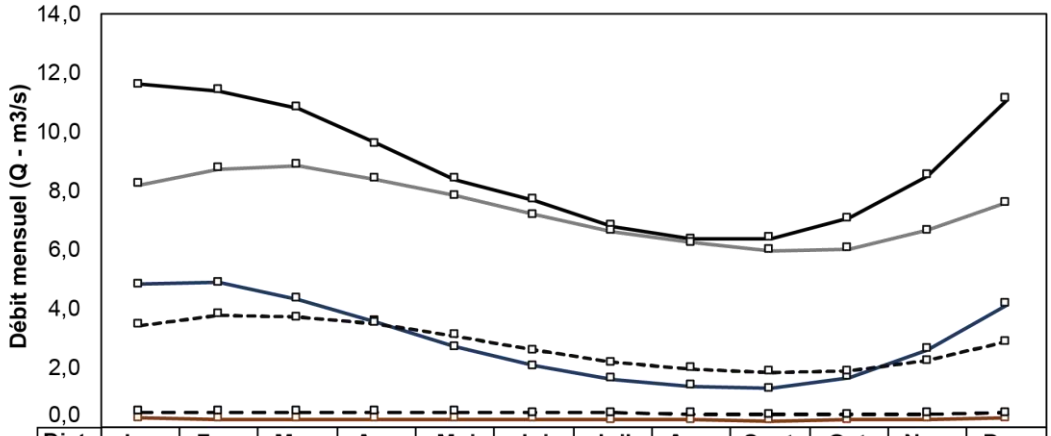


Figure 1.14 : Profil en long et en travers des vallées de L'Yères et de La Bresle et photographie aérienne de la basse vallée de L'Yères (vue depuis Criel-sur-Mer vers le nord-ouest)

Les bassins d'études retenus, dans le cadre de cette thèse et du projet ANR RICOCHET, bénéficient d'un suivi en continu des débits liquides ainsi que des lames d'eau, depuis plus de 30 ans pour certains bassins (Figure 1.15). Ce suivi est assuré par les services de l'État[2] (DREAL, DDTM, DGPR), par les établissements publics administratifs (EPA – Vigicrues, Météo France Cerema, IGN, l'Agence de l'eau Seine Normandie, etc.) et par des programmes de recherches (Interreg Beach at Risk, Seine Aval 3 et 4, etc.).

[2] DREAL : Direction régionale de l'environnement et de l'aménagement et du logement ; DDTM : Direction départementale des territoires et de la mer ; DGPR : Direction générale de la prévention des risques ; Cerema : Centre d'études et d'expertise sur le risque, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

Les données ainsi acquises sont bancarisées sur la plateforme Hydro Eau France (ou banque Hydro) administrée par le SCHAPI (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) disponible sur le site http://www.hydro.eaufrance.fr/. Sur les sept bassins identifiés, 16 stations ont été installées (cinq sur La Touques, une sur Le Dun, trois sur La Saâne, une sur La Scie, trois sur L'Arques, une sur L'Yères et deux sur La Bresle). Pour chacun des bassins, la station hydrologique la plus en aval du cours d'eau a été choisie afin de déterminer les débits et les lames d'eau dans les basses vallées. La distance entre ces stations et l'exutoire varient de 4 km (Le Dun, L'Yères) et à 24 km (La Saâne).



	Dist.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aou.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
La Touques	11	11,6	11,4	10,8	9,6	8,4	7,7	6,8	6,4	6,4	7,1	8,5	11,1
Le Dun	4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
La Saâne	24	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
L'Arques (Béthune)	8	4,8	4,9	4,3	3,6	2,7	2,0	1,6	1,4	1,3	1,7	2,6	4,2
L'Yères	4	3,4	3,8	3,7	3,5	3,1	2,6	2,2	2,0	1,8	1,9	2,2	2,9
La Bresle	6	8,2	8,8	8,9	8,4	7,8	7,2	6,6	6,3	6,0	6,0	6,7	7,6

Dist. : Distance de la station hydrologique par rapport à l'exutoire du bassin (en km) *Source des données : Hydro Eau France (MEDDE)*
La Scie : données non disponibles

Figure 1.15 : Débits mensuels sur 30 ans des bassins des sites d'étude (données issues de la Banque Hydro)

Pour les bassins de La Touques, de La Bresle, de L'Arques et de L'Yères, deux tendances saisonnières sont identifiées (Figure 1.15) : (1) une période hivernale, de décembre à mai, où les débits sont soutenus ; (2) une période estivale de juin à novembre présentant des débits d'étiage. Les bassins du Dun et de l'Yères présentent de faibles débits avec de faibles disparités saisonnières. Les données sur le bassin de la Scie sont, à l'heure actuelle, indisponibles.

1.2.3.2. Typologie des bassins versants côtiers

À partir de cette description de la morphologie et du comportement hydrologique des bassins, une première typologie est réalisée afin de regrouper les bassins présentant des similitudes. Ces similitudes peuvent être des clés d'explication pour la suite dans l'analyse des potentiels effets de concomitance. Nous avons intégré à cette typologie le temps de concentration des bassins pouvant être un des éléments de réponse aux vitesses de blocage des écoulements par la mer.

La Touques et la Bresle présentent les plus forts débits avec une moyenne respective de 8,8 et 7,4 $m^3.s^{-1}$. Le bassin de l'Arques ne dispose pas de station à la confluence ou à son exutoire et les débits choisis proviennent de son affluent principal, la Béthune, ce qui explique les plus faibles débits au regard de La Touques ou de La Bresle. Au-delà des conditions météo-climatiques régissant la réponse hydrologique des bassins, les caractéristiques physiques et

morphologiques influencent également le bilan hydrologique et l'écoulement du bassin (Roche, 1963 ; Strahler, 1964 ; Bendjoudi et Hubert, 2002). La forme des bassins se traduit grâce à un indice (K) proposé par Gravelius en 1914 (Wisler et Brater, 1959 ; Ward, 1975) :

$$(1)\ K = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0{,}28.\frac{P}{\sqrt{S}}$$

Où P est le périmètre (km) et S est la superficie (km²) du bassin.

La pente indiquée dans le tableau (Tableau 1.1) correspond à la pente moyenne (P_{moy}) du cours d'eau principal :

$$(2)\ P_{moy} = \frac{\Delta H}{L}$$

Où ΔH est la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas du cours d'eau et L est la longueur du drain principal.

Tableau 1.1. Morphologie et pente moyenne des bassins des sites d'étude

	P_{moy} (%)	K	Forme
Bassin de la Touques	0,19	3,07	Très étirées à contours lobés
Bassin du Dun	0,40	1,28	Ovoïdale
Bassin de la Saâne	0,34	2,60	Très étirées à contours lobés
Bassin de la Scie	0,37	1,79	Étirée
Bassin de l'Arques	0,23	2,98	Très étirées à contours lobés
Bassin de l'Yères	0,32	1,64	Étirée
Bassin de la Bresle	0,24	1,65	Étirée

Le bassin de la Touques et de l'Arques présentent des caractéristiques morphologiques (K ≈ 3) et des pentes (P_{moy} ≈ 0,20 %) similaires. Au regard des conditions météo-climatiques et de cette similitude morphologique, une hypothèse peut être émise sur la similitude des débits à l'exutoire de ces deux bassins. Le bassin de La Bresle présente des pentes de l'ordre de 0,20 %, mais possède une forme moins étirée que La Touques et L'Arques ce qui pourrait partiellement expliquer des débits plus faibles. Les bassins Du Dun, de La Saâne, de La Scie et de L'Yères possèdent des pentes plus importantes [0,30 à 0,40 %], des superficies plus modestes et des formes variables (ovoïdale à très étirée) expliquant en partie les débits plus faibles.

Une analyse des temps de concentration (T_c), c'est-à-dire le temps nécessaire à ce qu'un bassin réagisse à des précipitations, permet de compléter l'analyse de ces similitudes (Tableau 1.2). D'importantes différences peuvent exister entre les différentes formules classiquement utilisées. Pour cette raison, nous avons choisi de moyenner trois différentes formules afin d'obtenir des ordres de grandeur fiables. Les formules de Kirpich (1940), de Giandotti (1934) et de Passini ont ainsi été utilisées (Li et Chibber, 2008 ; Salimi *et al.*, 2017) :

$$(3)\ Kirpich \rightarrow\ T_c = 7{,}8.10^{-3}.\left(\frac{L^{0,77}}{Pe^{0,385}}\right)$$

Où L est la longueur du cours d'eau (m) et Pe est la pente (m/m).

$$(4)\ Giandotti \rightarrow\ T_c = \frac{0{,}4.\sqrt{S}+1{,}5.10^{-3}L}{0{,}8.\sqrt{Pe.L}}$$

Où S est la surface du bassin (ha).

$$(5)\ Passini \rightarrow Tc = 0{,}14\frac{(S.L)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{Pe}}$$

Où S est la surface du bassin (km²).

Les sous-bassins et vallons secs auront des comportements et temps de réponse beaucoup plus courts (à l'heure ou à la minute) et dépendent de facteurs morphologiques, d'occupation des sols et de schémas météo-climatiques particuliers (Delahaye, 2008 ; Douvinet, 2008). Des recherches ont permis d'estimer des débits proportionnels à la surface des bassins où 1 km² = 1 m³.s⁻¹ (Delahaye *et al.*, 2001 ; Douvinet *et al.*, 2006, 2015 ; Braud *et al.*, 2014).

Tableau 1.2. Temps de concentration (Tc) en heure des bassins versants selon les formules de Giandotti, Kripich et Passini

	Giandotti (h)	Kripich (h)	Passini (h)	Moyenne (h)
Bassin de la Touques	26,6	11,6	27,7	22,0
Bassin du Dun	10,6	1,7	4,1	5,5
Bassin de la Saâne	15,8	4,8	10,5	10,4
Bassin de la Scie	17,7	5,3	11,2	11,4
Bassin de l'Arques	23,1	7,4	20,0	16,8
Bassin de l'Yères	14,4	4,4	9,5	9,4
Bassin de la Bresle	20,8	7,4	17,8	15,3

Au regard des caractéristiques morphologiques, des temps de concentrations moyens ainsi que des données hydrologiques, les bassins peuvent être classés en trois groupes :

(1) Les **grands bassins versants côtiers**, **à fort débit,** à pente faible et à temps de réponse lent. Cette catégorie comprend le bassin de La Touques (Q_s (débit spécifique) = 9,9 l.s⁻¹.km², lame d'eau annuelle = 313 mm, T_c moyen = 22 h, $P_{moy} \approx$ 0,2 % et $K \approx 3$), le bassin de L'Arques (Q_s = 9,5 l.s⁻¹.km², lame d'eau annuelle =299 mm, T_c moyen = 16,8 h, $P_{moy} \approx$ 0,2 % et $K \approx 3$) et le bassin de La Bresle (Q_s = 10,6 l.s⁻¹.km², lame d'eau annuelle = 335 mm, T_c moyen = 15,3 h, $P_{moy} \approx$ 0,2 % et $K \approx 1{,}7$;

(2) Les **bassins versants côtiers de taille moyenne, à débit moyen**, de pente faible à moyenne et à temps de réponse moyen. Cette catégorie comprend le bassin de La Saâne (Q_s = 9,0 l.s⁻¹.km², lame d'eau annuelle = 283 mm, T_c moyen = 10,4 h, $P_{moy} \approx$ 0,3 % et $K \approx$ 1,3), le bassin de La Scie (Q_s et lame d'eau annuelle non disponible, T_c moyen = 11,4 h, $P_{moy} \approx$ 0,4 % et $K \approx 1{,}8$) et le bassin de L'Yères (Q_s = 10,3 l.s⁻¹.km², lame d'eau annuelle = 325 mm, T_c moyen 9,4 h, $P_{moy} \approx$ 0,3 % et $K \approx 1{,}6$) ;

(3) Les **petits bassins versants côtiers à faible débit,** pente moyenne et temps de réponse rapide. Cette catégorie comprend le bassin Du Dun (Q_s = 2,6 l.s⁻¹.km², lame d'eau annuelle = 82 mm, T_c moyen = 5,5 h, $P_{moy} \approx$ 0,4 % et $K \approx 1{,}3$).

Les différents bassins présentent donc des comportements différents en termes de fonctionnement (crues et débordements de cours d'eau) pouvant s'expliquer d'une part par leur forme (longueur et largeur de la basse vallée, pente), leur temps de concentration, mais également par leurs aménagements. La présence d'aménagements hydrauliques, nécessaire pour la protection des populations, va engendrer une complexification sur les effets potentiels de blocage des écoulements par la mer (présence ou non d'un clapet de régulation des flux, présence de conduits, etc.).

Ces vallées littorales sont systématiquement propices à des risques d'inondation. Les bassins de groupe (1) bénéficient d'au moins un PPRi prescrit. Les bassins La Saâne, de La Scie et de

L'Yères (groupe (2)), bénéficient également d'un PPR. Le bassin du Dun (groupe (3)) n'est, à l'heure actuelle, pas doté de PPRi, mais des analyses issues de la Directive-cadre inondation (2007/60/CE) ont été réalisées et des analyses sont disponibles sur les plus hautes eaux connues (PHEC).

1.2.4. Contexte hydrodynamique

L'hydrodynamisme de la Manche a un impact significatif sur le littoral normand. Ces impacts se traduisent par une érosion marine accentuant les phénomènes de glissements et d'éboulements sur les falaises (Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2019), par un blocage, au moins partiel, des écoulements lors de niveaux marins importants (Fisson *et al.*, 2014 ; Fisson et Lemoine, 2016 ; DDTM, 2016, 2018) ainsi que des inondations par submersions marines en front de mer et dans les zones basses (Raji *et al.*, 2011).

La section 1.2.4.1 présente les caractéristiques hydrodynamiques en Manche (courant de marée, seuils de niveaux marins, etc.). La section 1.2.4.2 décrit les événements de tempêtes majeures survenues dans la Manche responsables, ou non, d'inondations par submersions marines. La section 1.2.4.3 met en avant les différents facteurs intervenant durant une submersion marine (par paquet de mer ou par surverse).

1.2.4.1. La mer de la Manche : un contexte macrotidal

Le niveau marin, la surcote et le *runup* sont influencés significativement par la pression atmosphérique, la force et la direction des vents, mais également par les courants de marée. Lorsque les courants sont opposés à la direction des vents, le *swash runup* s'amplifie (SHOM, 1996). En Manche Orientale, la vitesse des courants est affectée par le Cotentin produisant un tourbillon anticyclonique (tourbillon de Barfleur) protégeant partiellement l'estuaire de la Seine des courants d'ouest (Figure 1.16). Les vitesses varient de 0,5 à 1 $m.s^{-1}$ dans la baie de Seine et jusqu'à 2 $m.s^{-1}$ à Etretat sur la Côte d'Albâtre (Costa et Delahaye, 2002 ; Letortu, 2013) (Figure 1.16 – rose des houles).

La marée semi-diurne se manifeste chaque jour à travers deux pleines et deux basses mers. Ces marées se succèdent toutes les six heures et 13 minutes. Durant une pleine mer ou une basse mer, des différences de hauteur d'eau en mer peuvent être ressenties allant de 0,1 à 0,2 m. Cette dissymétrie se traduit par un montant plus court que le perdant, surtout lorsque les coefficients de marée sont importants (Cerema, 2019). Le marnage croît d'ouest en est de l'estuaire de la Seine jusqu'à la baie de Somme et passe de 5 m à Cherbourg en période de vives-eaux (2 m mortes-eaux) à 6 m au cap d'Antifer en période de vives-eaux (2,5 m en mortes-eaux). L'amplitude maximale est estimée à plus de 8 m à Dieppe et en baie de Somme pour des coefficients de marée de 120 (Tableau 1.3). La Côte d'Albâtre est également plus affectée par les courants de marée et le mouvement des houles que la baie de Seine.

L'onde de marée, provenant de l'Atlantique, se propage en direction du nord-est et pénètre dans la Manche sous la forme d'une onde progressive. Cette onde se combine avec une onde stationnaire de moindre importance engendrée par un effet de résonance dans le bassin de la Manche. La paroi orientale se confond avec la côte française située au sud du Pas-de-Calais. La combinaison d'ondes stationnaires et progressives, est renforcée par un effet de surélévation des fonds et de la configuration des côtes engendrant d'importantes différences en termes de hauteur d'eau entre les marées de pleine mer et de basse mer.

Au niveau de la Côte Fleurie, en raison des profondeurs décroissantes, un phénomène de « tenue de plein » (*i.e.* une longue période de pleine mer durant laquelle la hauteur d'eau en

mer varie très faiblement) se produit après une rapide montée des eaux. La mer se maintient à un certain niveau sur une durée d'environ 3 heures durant lequel les variations sont inférieures à 30 cm en vives-eaux et mortes-eaux. Ce phénomène est engendré par un effet de résonnance (ondes secondaires) avec l'onde semi-diurne sur l'estuaire de la Seine (Cerema, 2019).

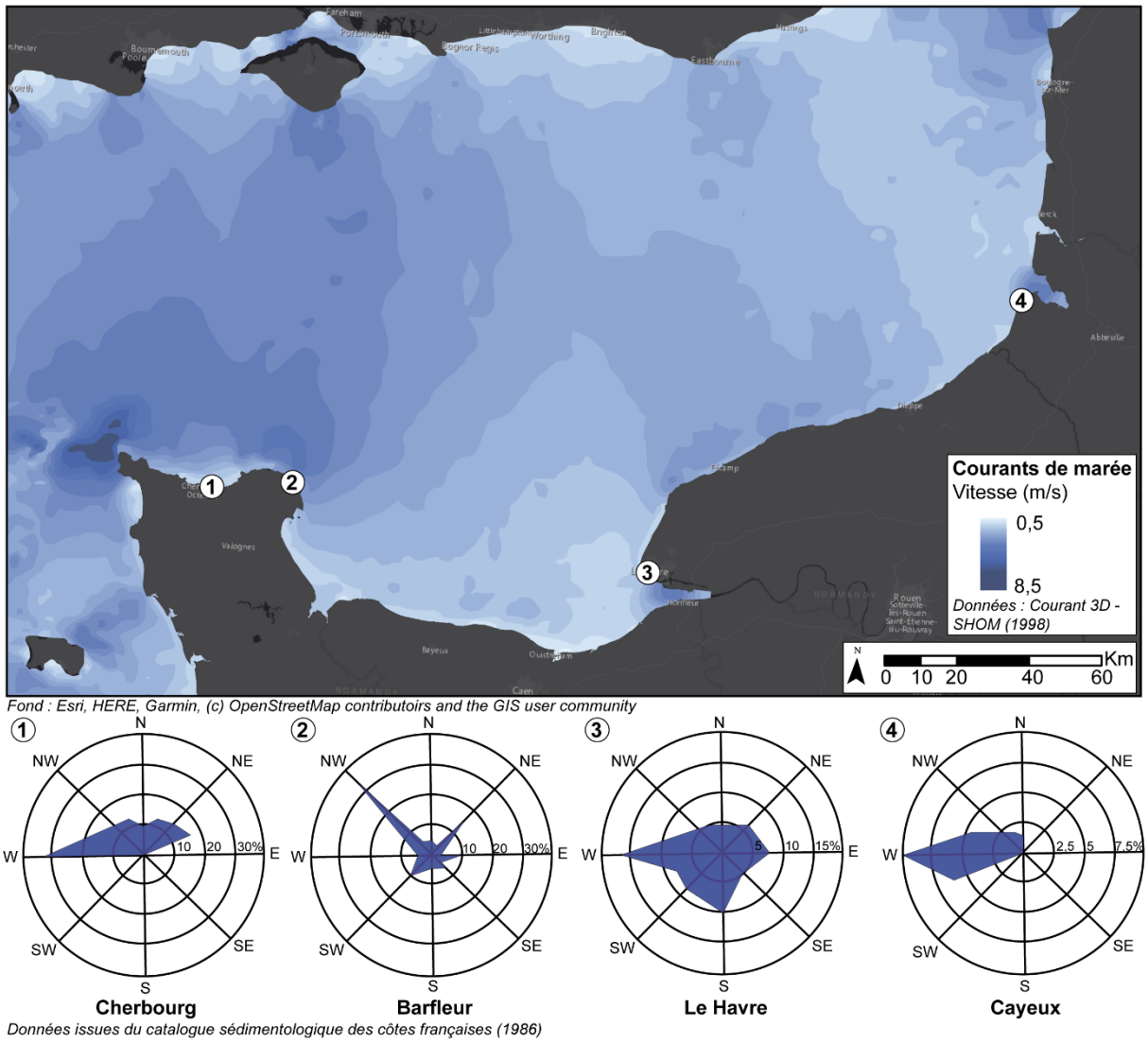


Figure 1.16 : Courants de marée et roses des houles à Cherbourg, Barfleur, Le Havre et Cayeux (données : modèle Courant 3D du SHOM, 1998 et catalogue sédimentologique des côtes françaises, 1986 – Roses des houles mises à jour à Cherbourg et Le Havre dans le catalogue sédimentologique des côtes françaises– Cerema, 2019)

Plusieurs conditions météo-marines et morpho-sédimentaires sont nécessaires pour qu'un franchissement par la mer soit possible sur le littoral normand picard (Costa, 1997 ; Cantat *et al.*, 2012 ; Letortu *et al.*, 2016). Deux situations permettent ce franchissement (Costa, 1997) :

(1) Dans un tiers des situations, les phénomènes de submersion sont liés à une circulation rapide d'ouest en est, accompagnés de vents de nord-ouest, en phase avec un niveau marin de pleine mer et de vives-eaux ;

(2) Dans deux tiers des situations, ces phénomènes sont engendrés par une dépression atlantique de haute latitude, provenant de la Mer du Nord, se traduisant par un renforcement des vents de nord-ouest et conjoint à une situation de pleine mer.

Tableau 1.3. Seuils marégraphiques aux ports du Havre et de Dieppe pour une référence altimétrique ZH (Zéro hydrographique) et Z NGF (IGN 69) (données issues du SHOM, 2017)[3].

	Marégraphe du Havre		Marégraphe de Dieppe	
	ZH (m)	Z NGF (m)	ZH (m)	Z NGF (m)
Seuils de submersion marine (PPR)	**8,88**	**4,5**	**10,55**	**6,1**
Niveau marin centennal	**9,88**	**5,5**	**14,34**	**9,89**
Niveau des plus hautes mers astronomiques	8,56	4,18	10,11	5,66
Niveau de pleine mer de vives-eaux	8	3,62	9,35	4,89
Niveau de pleine mer de mortes-eaux	6,7	2,32	7,4	2,95
Niveau moyen	**4,96**	**0,58**	**4,94**	**0,49**
Niveau de basse mer de vives-eaux	2,95	-1,43	2,55	-1,9
Niveau de basse mer de mortes-eaux	1,25	-3,13	0,8	-3,65
Niveau des plus basses mers astronomiques	0,3	-4,08	-0,07	-4,52

Ce type de situation se maintient tant que la dépression ne part pas et peut engendrer des houles allant jusqu'à 5,5 m. Cette situation se retrouve plus généralement durant des tempêtes majeures (basses pressions atmosphériques, vents dépassant les 100 km.h^{-1}, flux d'ouest, fortes précipitations, etc.).

1.2.4.2. Les événements de tempêtes majeures en Manche

Dans le cadre de cette thèse, un premier inventaire des inondations historiques a été réalisé sur la période 1909 – 2019 grâce à l'utilisation de plusieurs sources de données et d'informations à l'échelle du Calvados et de la Seine-Maritime. Ces informations proviennent des bases de données universitaires, des bases de données des services de l'Etat, des documents d'archives, des rapports et des journaux locaux. Cet inventaire a pu être réalisé, en grande partie, grâce aux travaux de recherche réalisés par Costa (1997), Letortu (2013), aux fiches tempêtes VIMER (Météo France, 2018), aux instruments de mesure (marégraphe du Havre et de Dieppe) mis en ligne par le SHOM, ainsi qu'aux travaux de synthèse du Réseau d'Observatoire du Littoral (2018).

Au total, 78 submersions marines ont été recensées en Manche (Costa, 1997 ; Letortu, 2013 ; Letortu *et al.*, 2016). Sur ces 78 submersions, 17 ont impactées la Côte fleurie (site d'étude n°1) comprenant six submersions sévères. Sur la Côte d'Albâtre, entre Quiberville et Dieppe (site d'étude n°2), 23 cas de submersions marines ont été recensés dont huit sont considérés comme sévères. Entre Criel-sur-Mer et Ault (site d'étude n°3), 30 submersions marines ont été recensées dont 19 sont considérées comme sévères. Une submersion est considérée comme sévère lorsqu'elle engendre des dégâts donnant lieu un arrêté CatNat.

Les cas de submersions marines sévères sont systématiquement liés à des tempêtes majeures. Parmi les événements les plus importants, les événements les plus marquants sont (Figure 1.17) :

(1) La tempête Vivian (25 et 27 février 1990) – coefficient de marée de 107 pour une surcote d'environ 0,9 m ;

(2) La tempête Lothar (25 et 25 décembre 1999) – coefficient de marée de 94 pour une surcote de 0,7 m à 1 m et des hauteurs de vagues de 4 à 6 m ;

(3) La tempête Xynthia (26 février 2010) – coefficient de marée de 108 pour des hauteurs d'eau en mer enregistrées allant jusqu'à 10,14 m ZH sur le marégraphe de Dieppe ;

[3] La différence entre le zéro hydrographique et zéro NGF 69 est de 4,38 m au port du Havre et de 4,45 m au port de Dieppe.

(4) La tempête Eleanor (3 et 4 janvier 2018) –coefficient de marée de 108 ont pu être enregistrés ainsi que des rafales supérieures à 100 Km.h^{-1}.

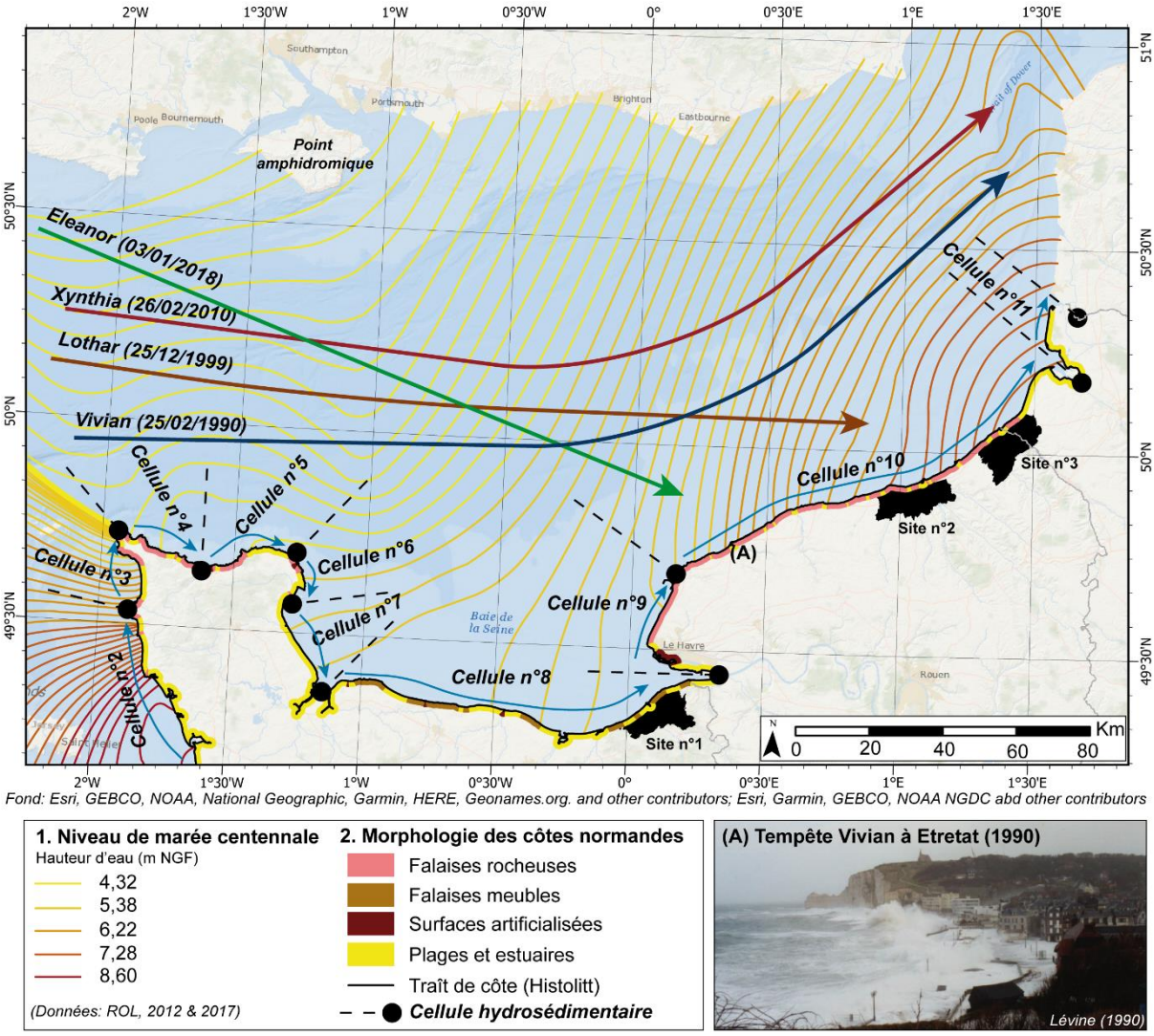


Figure 1.17 : Trajectoire de quatre tempêtes majeures survenues en Manche, niveaux associés à un événement centennal et morphologie des côtes normandes

Dans le cadre de l'actualisation du Catalogue sédimentologique des côtes françaises, un inventaire des événements de tempêtes majeures survenues en Manche entre le cap d'Antifer et le cap de la Hague (Tableau 1.4) a été réalisé par nos soins pour l'ouvrage « Dynamiques et évolution du littoral. Fascicule 3 : Synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague » (Cerema, 2019). Cet inventaire a permis d'obtenir une première description des principaux événements mais a nécessité par la suite d'être complété et harmonisé (en termes d'informations quantitatives). L'inventaire complété et détaillé, sur la période 1984 – 2019 est présenté dans le chapitre 4.

Tableau 1.4. Les événements de tempêtes majeures survenant dans La Manche du Cap d'Antifer au Cap de La Hague entre 1905 et 2018 (recensées par (1) Météo-France-France, (2) Vimer, (3) BRGM, (4) Levoy (1986), (5) DDTM 14, (6) Letortu (2013) ; données marines issues du Shom.fr, 2005. Réalisation K. Graff (Cerema, 2019)

Date	Localisation	Dégâts au littoral	Vent	Niveau marin observé (CM) / coef. de marée	Source	Référence
28 Octobre 1909	Côte est du Cotentin	Rupture de la digue entre Grandcamp et Becqueville. Une épaisseur de couche de galet de 25 cm s'est accumulée sur l'ensemble du linéaire côtier. La mer a avancé jusqu'à 1,5 km dans les terres. Les dégâts sont estimés, de Cherbourg au Grand Vey à 359 000 francs.	Nord-est	1,5 m d'eau observé dans Cherbourg et Grandcamp / coef. 108	3), (5) et (6)	TRI Cherbourg-Octeville, Maertens 2016
1er Janvier 1910	Côte du Bessin et Côte Fleurie	Côte est du Cotentin, Côte du Bessin, côte de nacre et Côte Fleurie	/	7 à 8 m (surcote de 0,45 m) / Coef. 100	(5)	TRI de Cabourg
8 Janvier 1924	Côte est du Cotentin, Côte du Bessin, côte de nacre et Côte Fleurie	Nombreuses épaves, ports détruits, murs écroulés, magasins inondés, routes et lignes et de chemins de fer coupées, lignes téléphoniques détruites	Sud-ouest	Pas d'informations	(1) et (2)	
12 Novembre 1931	Côte du Bessin	« Un raz de marée a occasionné de nombreux dégâts entre les communes d'Asnelles et Ver-sur-Mer. Le chemin de G.C. N°205, territoire de Meuvaines, a été submergé sur une longueur de 3 km 500. L'eau atteignait à certains endroits 50 cm sur le milieu de la chaussée. […] La digue d'une hauteur de 1,2 m, située au lieu la Maisonaux-Chiens, territoire de Meuvaines, a été emporté sur 80 m. Plus loin, en direction de Ver-sur-Mer, les galets et le sable recouvrent la route sur une hauteur de 50 cm par endroit et ce, sur plus de 500 m. […]»	Pas d'informations	Pas d'informations	(4) et (6)	L'Ouest-Eclair, DDTM-14
6 Novembre 1934	Côte du Bessin	« Un coup de mer de Nord-Est, aussi brutal que celui de 1909, lance des lames de 20 m sur la digue de Grandcamp, qui se lézarde et s'effondre, bouche le chenal du port avec d'énorme paquets de varech »	Pas d'informations	Pas d'informations	(4) et (6)	http://j.y.merienne.pagespersoorange.html
7 Août 1948	Côte est du Cotentin, Côte du Bessin et Côte Fleurie	On dénombre 14 morts de la Bretagne au Pas-de-Calais et 100 millions de francs de dégâts,	Ouest	6 à 9 m / Coef. 105	(1) et (2)	Ouest-France
31 Décembre 1955	Côte du Bessin et Côte de Nacre	« Plusieurs mètres de dunes ont été dévorés par la mer, tandis qu'un morceau du quai a cédé sous la poussée impétueuse des flots » ; « les pêcheurs colmatent les brèches importantes que la mer a ouvert dans le quai et la digue »	Pas d'informations	Pas d'informations	(4) et (6)	Liberté de Normandie

12 Septembre 1957	Côte Fleurie	« La digue des Roches- Noires à Trouville n'a pas résisté à la dernière tempête : les flots déchaînés y ont ouvert une énorme brèche. Le parapet s'est effondré et la chaussée s'est affaissée sur 25 m de longueur, 6 m de largeur et 5 de profondeur. Des villas riveraines sont menacées »	Pas d'informations	Pas d'informations	(4) et (6)	Ouest-France
5 Avril 1962	Côte Fleurie	À Deauville la mer submerge le Boulevard longeant la plage et atteint les cours de tennis. Les établissements sont touchés et les portes arrachées. Le restaurant « Le Ciro's » a été submergé par les flots. À Trouville-sur-Mer, l'ensemble du quartier commerçant a été submergé par la mer. Les caves sont inondées et d'importants dégâts sont recensés. Le quai près de l'ancien établissement de bain est détruit. À Hermanville, la digue est détruite sur un linéaire de 300 m,	Pas d'informations	Pas d'informations	(4) et (6)	Ouest-France et Liberté de Normandie
19 Novembre 1962	Côte de Nacre et Côte Fleurie	À Asnelles-sur-Mer la mer à endommagée et emportée la digue, en face de l'ancien blockhaus, et a engendré l'effondrement du trottoir.	Pas d'informations	Pas d'informations	(4) et (6)	Ouest-France
6 Juillet 1969	Côte du Bessin, Côte de Nacre et Côte Fleurie	Campings et chalets endommagés, arbres arrachés, toiture et fenêtres détruites, réseau endommagé, bateaux coulés. Une brèche de 12 m dans la digue à l'Est de la cale de Eisenhower.	Nord-ouest	8 m / Coef. Non renseigné	(1), (2) et (5)	CETE Normandie - LRPC de Rouen
1er Février 1974	Côte Fleurie	À Dives-sur-Mer, une tempête ouvre une brèche de 10 m dans la digue en terre en limite de Périers-en-Auge et de Dives-sur-Mer.	Non renseigné	8,6 m (surcote de 1,2 m) / Coef. Non renseigné (marée haute)	-5	TRI de Dives-sur-Mer
31 Décembre 1978	Côte du Bessin	À Arromanches, une tempête endommage les digues entre les cales Neptune et Eisenhower sur 65 m de long et une brèche de 43 m apparaît à l'Est de la Cale Eisenhower	Nord-ouest	Surcote de 0,62 m / Coef. Non renseigné	(2), (5) et (6)	CETE Normandie - LRPC de Rouen
29 Janvier 1983	Côte Fleurie	À Villerville et Villers-sur-Mer une submersion marine pénètre dans les digues et les quais et inonde les caves des bâtiments en bord de plage. L'érosion des falaises argileuses a été aggravée. À Villers-sur-Mer des garages ont été emportés par les vagues ont provoqué une érosion du rivage sur une dizaine de mètres. À Trouville-sur-Mer, la digue près des Vaches Noires a été partiellement détruite.	Pas d'informations	Pas d'information	(4) et (6)	Liberté Le Bonhomme Libre
26 Février 1990	Côte du Bessin	Tempête Vivian : à Graye-sur-Mer, une succession de tempête marque les mois de janvier et février. Un total de 150 m de dune a été érodée à l'Est du Blockhaus du Bisson et l'Ouest de la Brèche du Bisson.	Nord-ouest	Surcote de 1 m / Coef. 108	(2), (5) et (6)	Bulletin municipal de Graye-sur-Mer (1990)
19 Février 1996	Côte du Bessin et Côte de Nacre	La tempête a notamment provoqué des inondations importantes sur les communes de Ver-sur-Mer et Vierville-sur-Mer	Nord-est	Surcote de 0,15 m / Coef. 113	(2), (4), (5) et (6)	PPRN (Dives-Orne et Bessin), Gaspar et Poullain (1996)
13 Janvier 1998	Côte est du Cotentin, Côte du	500 000 foyers privés électricité, nombreuses toitures arrachées, clochers abattus, arbres déracinés, camions renversés	Ouest	7 m (surcote 0,79 m) / Coef. Non renseigné	(1) et (2)	/

	Bessin et Côte Fleurie					
25 Décembre 1999	Côte du Bessin et Côte Fleurie	Tempête Lothar : de nombreuses habitations sont inondées dont le quartier de la station de voile à Asnelles	Nord-ouest	8,9 m (surcote de 0,7 à 1 m) / Coef. 94	1), (2) et (5)	«Les tempêtes exceptionnelles de Noël 1999», de Baleste M.-C. et al., (2001), INA1 (2012), PPRN (Dives-Orne et Bessin)
17 Décembre 2004	Côte est du Cotentin, Côte du Bessin et Côte Fleurie	Tempête Dagmar : à Honfleur le « quai de la Quarantaine» a été submergé par la mer.	Nord-ouest	(Vagues de 4 à 5 m) / Coef. 71	(1) et (2)	Ouest-France
26 Février 2010	Côte du Bessin et Côte de Nacre	Tempête Xynthia : de nombreux dégâts sur les ouvrages et environ 80 maisons inondées à Ver-sur-Mer, Asnelles et Bernières-sur-Mer.	Nord-ouest	8,84 m (surcote de 0,87 m) / Coef. 102	(1), (2), (5) et (6)	SHOM-REFMAR
3 Janvier 2018	Côte du Bessin, Côte de Nacre et Côte Fleurie	Tempête Eleanor : rupture de la digue à Ver-sur-Mer, les habitants ont été évacués. À Villerville trois personnes ont été piégées par la submersion marine dans un restaurant. Les vagues ont submergées et détruits ponctuellement des digues. À Deauville, l'eau a submergé les rues du port.	Nord-ouest	9,33 m (Surcote de 1,01 m) / Coef. 107	(1) et (2)	Ouest-France

Ces événements de tempête ont engendré pour la plupart des submersions marines. Ces submersions peuvent, dans certains cas, être statiques, appelées « *submersions par surverse* » (quand l'inondation côtière est liée à un débordement de la mer), ou « *submersions dynamiques* » dans le cas où les volumes d'eau sont issus d'un déferlement et donc d'un débordement par parquet de mer (Abtes et De Roo, 2000 ; Appel *et al.*, 2009 ; Gallien *et al.*, 2011 ; Breilh *et al.*, 2013 ; Letortu, 2013). La prise en compte d'une submersion dynamique est complexe, car elle nécessite des données sur la propagation des vagues, sur les ondes de tempête, sur le *wave setup*, sur les vagues infragravitaires, sur le *wave runup*, etc.

Dans le cadre de la recherche réalisée dans cette thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés aux potentiels effets de blocage des écoulements par la mer sur les rivières et de leurs impacts dans les basses vallées littorales. Nous pouvons supposer que les cas de blocage les plus importants sont liés aux événements de tempêtes majeures et/ou à des submersions marines. Pour cette raison, la suite de cette section présente les principaux facteurs intervenant localement durant une submersion marine afin de mieux saisir l'effet de blocage potentiel par la mer.

1.2.4.3. Les principaux facteurs intervenant dans les submersions marines

Les interactions entre processus marins et continentaux sont étroitement liées aux conditions météorologiques (vents, précipitations, pressions atmosphériques, etc.). Deux facteurs sont responsables du déclenchement des submersions sur les côtes normandes. D'une part, une dépression rapide d'est en ouest générant des vents de nord-ouest et d'autre part, une dépression atlantique provenant de la Mer du Nord engendrant des vents de nord-ouest (Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2016).

Une submersion marine est le franchissement puis l'inondation par la mer d'une zone côtière lors de conditions météorologiques et/ou océaniques de fortes intensités. Trois types de submersions se distinguent (Perherin *et al.*, 2012 ; Letortu *et al.*, 2012) :

(1) Les **submersions par débordement** (surverse) qui sont engendrées par une simple hausse du niveau marin ;

(2) Les **submersions par franchissement de paquets de mer** engendrées par le déferlement de la houle (*runup*) au-dessus des ouvrages de protection ou des cordons dunaires ;

(3) Les **submersions par rupture d'ouvrages** (issues d'une érosion intensive ou d'un mauvais entretien) permettant une inondation par débordement ou franchissement.

Les conditions météorologiques minimums requises pour la constitution des submersions nécessitent des vents de 8 m.s^{-1} (trihoraire) avec une direction comprise de [230° à 60°] (Letortu *et al.*, 2012).

Trois paramètres interviennent lors d'un événement de submersion marine (Figure 1.18) :

(1) Le **niveau de marée** : c'est une composante prédictible grâce des modélisations intégrant notamment les harmoniques de marée, la bathymétrie, les pressions atmosphériques prédites, etc. (Turki *et al.*, 2015) ;

(2) La **surcote** : c'est une composante non prédictible engendrant un niveau marin plus élevé (ou inversement dans le cas d'une décote) produit par des vents et/ou pressions atmosphériques exceptionnels (Costa, 1997 ; Daniel *et al.*, 2007 ; Cantat *et al.*, 2012) ;

(3) Le ***runup*** : c'est une composante difficilement prévisible en milieu macrotidal, représentant la différence altimétrique entre le jet de rive (combinaison du wave set up et swash runup) et un niveau marin sans houle (Komar, 1998 ; Cariolet et Suanez, 2013 ; Letortu, 2013). Engendré par les courants de marée, les vitesses et directions du vent, le runup peut atteindre pour exemple jusqu'à 0,8 m à Quiberville pour un événement de type centennal (DHI, 2008).

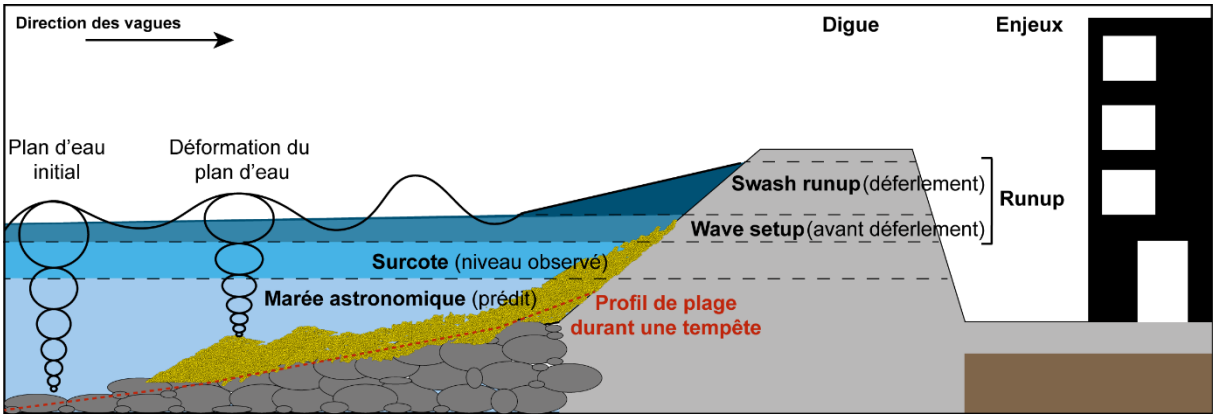


Figure 1.18 : Paramètres responsables des submersions marines en période ou hors période de tempête (modifié de Fichaut et Suanez, 2007 et de Letortu, 2013)

Les phénomènes de submersion ne sont pas à assimiler systématiquement aux événements de tempêtes, dénommées dans ce cas comme des « *submersions de tempête* » (Galli et Hontarrède, 2001). Les submersions sont les conséquences de faibles pressions atmosphériques et de forts vents d'afflux (Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2012, 2016). Dans un contexte macrotidal, le littoral

normand picard est soumis à un marnage supérieur à 6 m le rendant particulièrement sensible aux submersions marines (Guerin, 2003 ; SHOM, 2017). Ce type de marnage est lié aux faibles profondeurs bathymétriques (environ - 1,5 m à 1 km des côtes de l'estuaire de la Seine et environ - 7,5 m à 1 km des côtes du Pays de Caux), de la forme conique de la Manche, des mers de vents parfois importantes (e.g. tempête Vivian en 25 et 27 février 1990 et Lothar le 25 décembre 1999) et des forts courants de marée (Costa *et al.*, 2004).

Les conditions morpho-sédimentaires influencent également l'impact des submersions marines sur le littoral (Paskoff, 1985 ; Carter et Orford, 1993 ; Costa, 1997 ; Sabatier *et al.*, 2009 ; Letortu *et al.*, 2016). L'épaisseur du cordon de galet, lié à la présence de sable, est très variable en fonction de l'agitation des courants de marée, des hauteurs d'eau en mer et de la morphologie des plages (Mason *et al.*, 1997 ; Costa, 1997 ; Orford *et al.*, 2002 ; Pontee *et al.*, 2004 ; Costa *et al.*, 2008). En temps normal, le cordon de galet fait office de barrière de protection au niveau des plages. En période de tempête le profil de plage tend à s'abaisser (cf. Figure 1.18), ce qui a pour conséquence de rapprocher le point de déferlement de la houle directement sur la digue (Costa, 1997 ; Caspar *et al.*, 2010 ; Letortu *et al.*, 2016).

Les submersions marines vont régulièrement avoir un impact significatif sur les communes en façade littorale. De plus, si ces phénomènes ne sont pas nouveaux, ils s'inscrivent dans un contexte de changement climatique et anthropique. Depuis les dernières décennies, un développement économique et touristique s'est articulé autour des stations balnéaires.

1.2.4.4. Changements climatiques et impacts sur l'hydrodynamisme en Manche à l'horizon 2050 et 2100

Les projections climatiques définies par le GIEC (IPCC, 2019) et des programmes de recherche (projet Seine Aval : Laignel *et al.*, 2010 ; projet RexHySS : Ducharne *et al.*, 2009 ; DREAL, 2010, 2011) estiment une augmentation moyenne des températures de +1,5 à +3 C pour l'horizon 2050 et de +2 à +4 C à l'horizon 2100 en Normandie. Selon ces scénarios, une baisse générale des précipitations est attendue avec -6 % en 2050 et -12 % en 2100. Dans le cas d'un scénario sans politique climatique (RCP 8.5), les baisses sont estimées à –22 % durant les périodes chaudes (DREAL Normandie, 2019) (Figure 1.19). Comme un climat de type méditerranéen, la modification des capacités d'infiltration, couplées à précipitations plus intenses et sur de plus courtes périodes, interroge sur l'évolution des risques de crue turbide en période estivale.

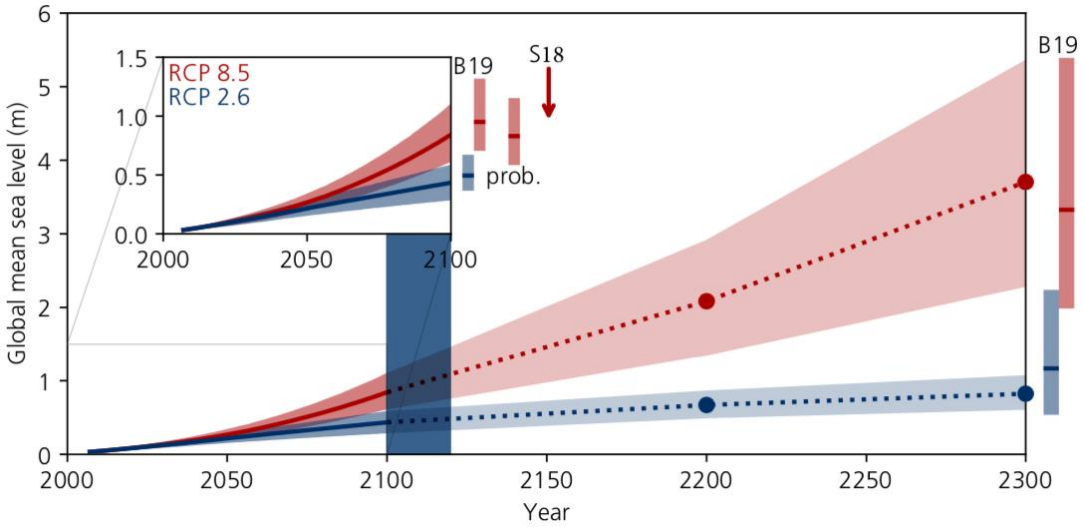


Figure 1.19 : Scénarios climatiques en lien avec une élévation du niveau marin RCP 2.6 et RCP 8.5 (IPCC, 2019)

L'élévation du niveau marin en Manche va avoir un impact majeur sur le littoral normand. Les taux actuels d'élévation (1993 – 2013) dans la mer de la Manche correspondent à la moyenne d'évolution estimée à l'échelle mondiale soit une élévation de +2 mm.an^{-1} (IPCC, 2013 ; Planchon *et al.*, 2015).

Cependant, les projections à l'échelle locale restent encore imprécises en raison des effets de site (température, salinité de l'eau, dynamiques atmosphériques, etc.) difficilement intégrables dans les modélisations. Pour ces raisons, il convient de considérer ces taux d'évolution à l'échelle la Manche et en considérant les projections à l'horizon 2100. Deux scénarios peuvent être ainsi envisagés :

(1) Un scénario moyen d'évolution avec une politique visant à faire baisser les gaz à effet de serre (GES) engendrant une élévation moyenne du niveau marin de +50 cm (RCP 2.6) ;

(2) Un scénario sans politique de réduction des GES engendrant une élévation du niveau marin de +1 m (RCP 8.5).

Ces changements climatiques vont avoir pour conséquences de modifier, et probablement d'augmenter, les secteurs terrestres atteints par la mer avec l'élévation du niveau marin (+ 1 m d'élévation avéré à l'horizon 2100 – IPCC, 2019) dans une situation normale, mais également dans une situation de tempête (Cerema, 2019). Les modifications de champ de pression et de vent attendus vont également avoir un impact sur les côtes au travers des surcotes marines (dépression, seiches) et des surcotes engendrées par les vagues (Nicolls *et al.*, 2011 ; Onerc, 2015). L'élévation du niveau, couplé à la déformation des vagues et modifications des vitesses des courants marins, vont profondément modifier les forçages hydrodynamiques en Manche et impacter par conséquent les côtes à falaises, les vallées littorales et les systèmes dunaires.

Dans les estuaires, ces changements climatiques et hydrodynamiques se manifesteront par des intrusions salines, des changements de salinité de l'eau ou une remontée du bouchon vaseux (*i.e.* une zone de turbidité maximale) dans l'estuaire (Cerema, 2019). Un changement de salinité du cours d'eau dans l'estuaire, engendré par des intrusions d'eau saline plus fréquentes, va nécessairement engendrer une avancée de la zone d'interface entre l'eau douce et l'eau salée dans les terres. Pour rappel, la masse volumique de l'eau salée est plus importante que l'eau douce et se retrouve donc sous-jacente aux écoulements fluviaux. Bien que l'influence de l'eau de mer sur les niveaux d'eau d'un cours d'eau soit encore difficilement quantifiable et mobilisable, il est probable que cette salinité ne soit pas sans conséquence en cas de débordement du cours d'eau dans les estuaires (Werner et Simmons, 2009 ; Lemoine, 2014).

En parallèle, l'élévation du niveau marin en Manche va entraîner des modifications des transferts sédimentaires au niveau des côtes ainsi que des apports solides (sables et vases) dans les fleuves et les estuaires. Une remontée du bouchon vaseux dans l'estuaire est susceptible d'entraîner une modification de la couverture sédimentaire dans le chenal et sur les rives et dans les estrans des cours d'eau (Cerema, 2019). Ces évolutions sont également dépendantes des usages au niveau du bassin versant et du lit majeur du fleuve, mais il est certain que ces modifications des dynamiques hydrosédimentaires auront une influence sur la nature ainsi que sur la répartition des espaces naturels terrestres.

1.2.5. Un contexte sociétal à forts enjeux

Depuis le XVIIIe siècle, le développement économique s'articule autour de l'industrie et de l'agriculture en lien avec le développement des pratiques agricoles. Entre les années 1960 – 1990, le paysage normand a progressivement évolué d'un paysage de bocage à un paysage en

openfield (Elhaï, 1963 ; Rebour, 2000). Ces changements territoriaux se sont accompagnés d'une évolution des modes d'occupation des sols et d'une artificialisation généralisée des sols. Si ces évolutions sont à l'origine d'un développement économique, elles ont également entraîné des changements sur le comportement des phénomènes naturels (e.g. imperméabilisation des sols, destruction des haies, installation d'épis pour retenir les sédiments dans les plages, etc.)

La section 1.2.5.1 s'intéresse à la répartition de la population et notamment au phénomène de périurbanisation dans les stations balnéaires. La section 1.2.5.2 présente les principaux modes d'occupation des sols et de consommation de l'espace à l'échelle de la Normandie. La section 1.2.5.3 est une description des principaux réseaux de transport permettant à la population de rejoindre les pôles de vie et de tourisme en différentes périodes de l'année.

1.2.5.1. L'hétérogénéité de la répartition de la population

La région de Normandie (~ 30 000 km²) présente une population croissante composée de 3,3 millions d'habitants en 2018 (INSEE[4], 2019). Les départements les plus peuplés sont la Seine-Maritime (> 1,2 million d'habitants) et le Calvados (~ 700 000 habitants) (DREAL Normandie, 2017). Les trois quarts des communes normandes possèdent moins de 1 000 habitants (INSEE, 2016 ; DREAL Normandie, 2018). La population est vieillissante, en 2017 la part des plus de 65 ans représente 18 % de la population totale et va passer à 25 % à l'horizon 2040 (INSEE, 2016). Pour les départements du Calvados (14) et de la Seine-Maritime (76), les trois grands pôles urbains normands sont Le Havre, avec 170 000 habitants, Rouen avec 110 000 habitants et Caen avec 105 000 habitants (Figure 1.20).

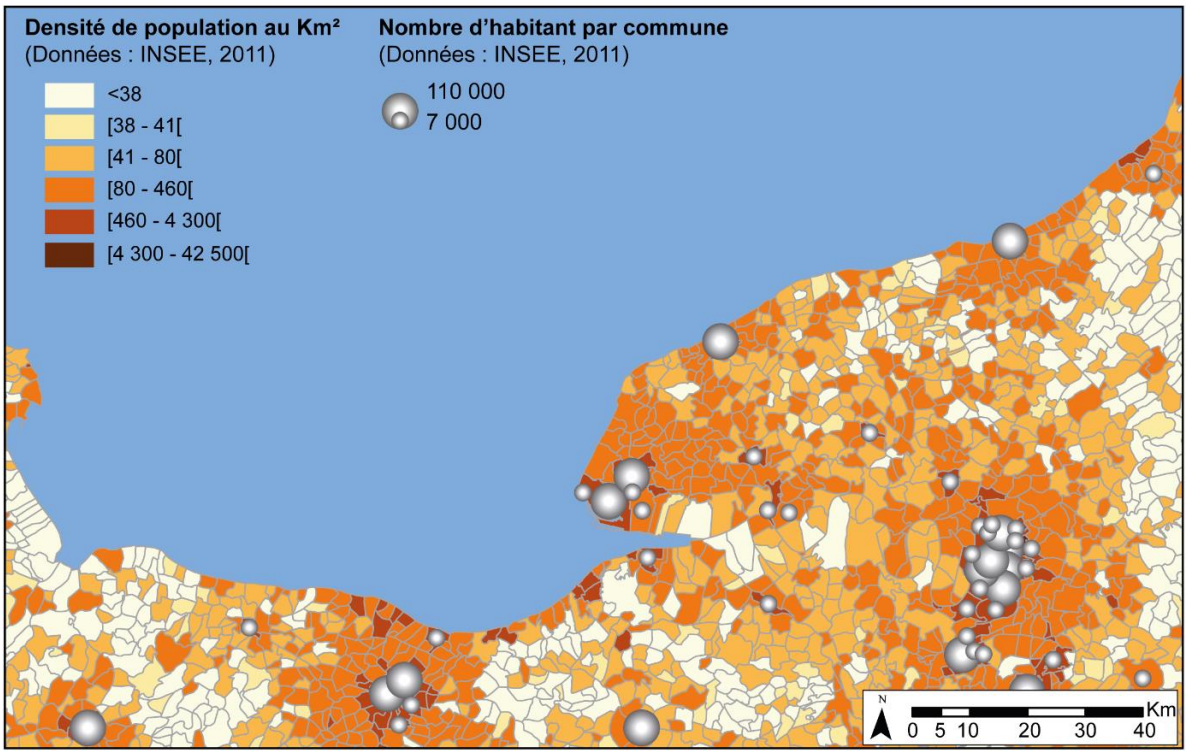


Figure 1.20 : Densité d'habitants au km² et nombre d'habitants par communes (données issues de l'INSEE, 2011 et de Geofla, 2016)

[4] INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

La répartition de population est inégale puisqu'un tiers sont dans les grandes agglomérations, un tiers dans les villes de tailles moyennes et un tiers dans les espaces ruraux et plus spécifiquement au sein des espaces littoraux. Pour exemple, le Calvados comprend seulement 15 villes comptant plus de 10 000 habitants (DREAL Normandie, 2017). En dehors des grandes agglomérations, les densités de population les plus importantes sont situées sur le littoral et correspondent aux stations balnéaires. Dans le Calvados, les stations balnéaires majeures sont localisées à Ouistreham, avec 855 hab./km², et sur la Côte Fleurie avec un maximum de 986 hab./km² à Deauville. Sur la Côte d'Albâtre, ce sont les stations de Fécamp (1 267 hab./km²), de Dieppe (2 500 hab./km²) et du Tréport (775 hab./km²). Entre ces stations balnéaires, les densités de population vont être variables et dépendre majoritairement des attraits touristiques (temps d'accès à la mer, présence de plage, etc.).

Comme on pouvait s'y attendre, les mouvements de populations sur les communes près des stations balnéaires sont plus significatifs entre la semaine et le week-end que durant la période estivale et hivernale en raison des facilités d'accès en transport à partir de la capitale (2 à 3 heures de transport). Le nombre de résidences secondaires est très important dans ces communes, pouvant représenter jusqu'à plus de 50 % des résidences pour des communes comme Deauville (INSEE, 2016).

1.2.5.2. Modes d'occupation des sols à l'échelle de la Normandie

Au regard des données Corine Land Cover (2012), le territoire normand est composé à 4 % de surfaces artificielles, à 86 % de surfaces agricoles, à 9 % de surfaces naturelles, et d'environ 2 % de zones humides et surfaces en eau (Figure 1.21). Comme évoqué précédemment, les zones urbaines denses sont localisées à Rouen, à Caen, au Havre et dans les stations balnéaires. Les communes littorales les plus urbanisées (et peuplées) sont Dieppe, Ouistreham, Deauville et Fécamp. Autour de ces agglomérations, les zones urbaines sont diffuses et composées pour la plus grande majorité d'habitats résidentiels pavillonnaires.

Au sein des surfaces artificielles, les zones urbaines discontinues sont nettement majoritaires à 2,7 % (contre >0,1 % de surface urbaine continue). Tandis que les zones industrielles et commerciales sont présentes sur 0,5 % du territoire. Au sein des surfaces agricoles, les terres arables non irriguées représentent 56 % du territoire et les pâtures/prairies environ 25 %. Les cultures permanentes sont très minoritaires (>1 %) avec les « autres types de culture », type surface en gel, etc. (5 %). Au sein des zones naturelles, les forêts denses sont présentes sur 7 % du territoire et les forêts mixtes ou clairsemées sur environ 2 %. Au sein des zones humides et surfaces en eau, les vasières représentent environ 1 % du territoire et les surfaces en eau (rivières) environ 0,35 %.

L'espace agricole est dominé par les cultures d'hivers (52 ,1 %) comprenant majoritairement du blé tendre, > 30 %, du colza à ~ 10 % et de l'orge à ~ 7 % (Recensement général agricole, 2010). Les cultures printanières tardives (17 % des terres arables) sont composées principalement de maïs, fourrage et ensilage (7 %) et de lin (~4 %). Les prairies représentent aujourd'hui une superficie d'environ 200 000 ha. Entre 1960 et 1980, avant le remembrement, leur superficie était deux fois plus importante (~ 410 000 ha). Ces politiques agricoles ont progressivement modifié le paysage de bocage normand entraînant une généralisation des problèmes liés aux ruissellements et crues turbides (Delahaye, 2003 ; Souchère *et al.*, 2003 ; Douvinet, 2008 ; Viel, 2012).

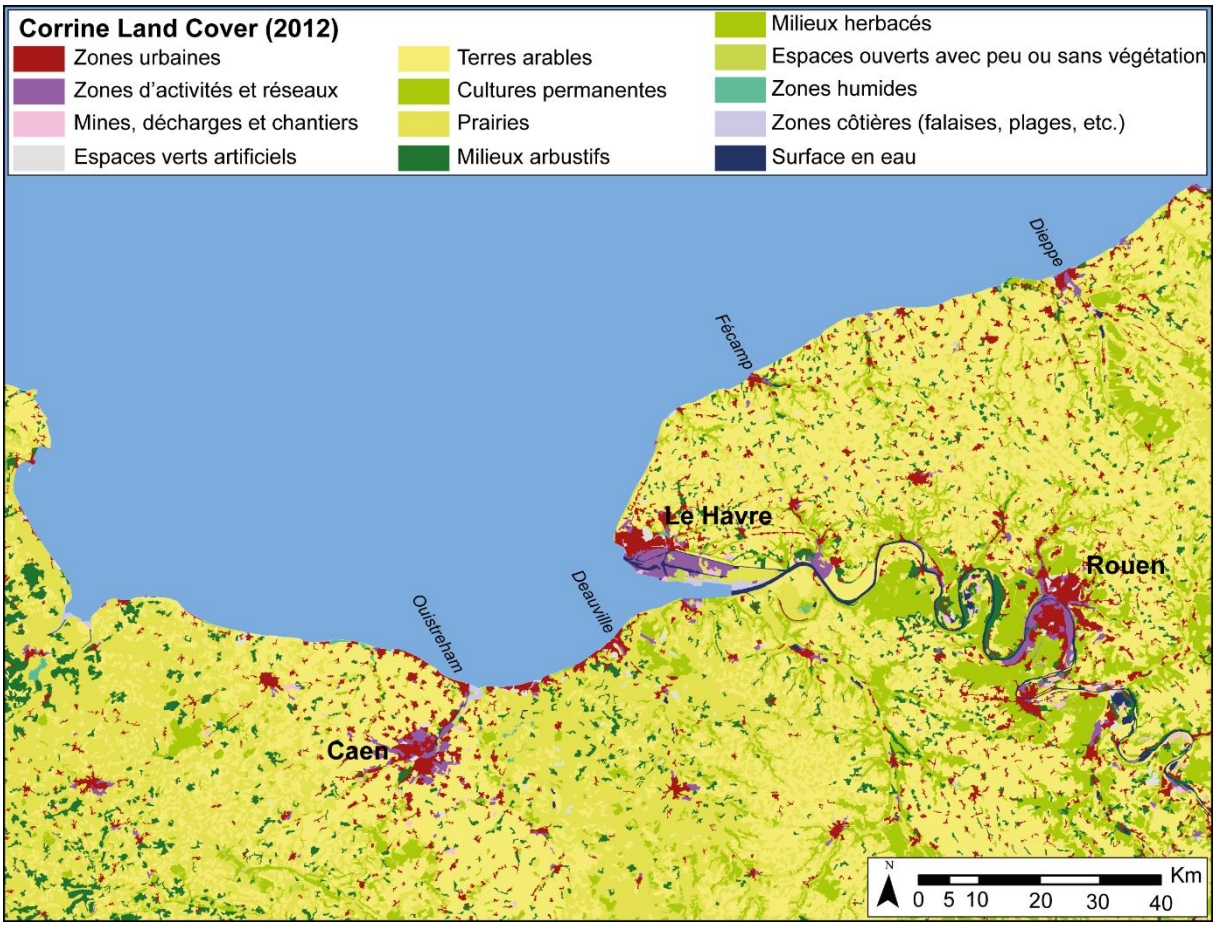


Figure 1.21 : Occupation des sols de la région Normandie (données Corine Land Cover, 2012)

1.2.5.3.Les réseaux de transport en Normandie

Entre les départements du Calvados et de la Seine-Maritime, les moyens et modes de déplacement sont à 76 % liés à l'automobile contre 10 % de transport en commun (DREAL Normandie, 2016). Au total, 431 communes (14,7 % de la population) ne sont pas équipées en transport en commun et ont une faible mobilité (DREAL Normandie, 2019). Afin de répondre au besoin de transport individuel, le réseau routier tend à se densifier (27 500 km de réseau routier en Seine-Maritime et dans le Calvados) (Figure 1.22).

Une des activités économiques majeures de la Normandie réside dans ses ports pêche et de plaisance. Les quatre ports majeurs, liés à la pêche et au transport des personnes et des marchandises sont Le Havre, Dieppe et Ouistreham (Caen) et Cherbourg. Dans l'estuaire de la Seine et sur la Côte d'Albâtre, les ports de Dieppe, du Havre et de Ouistreham bénéficient également d'un transmanche pour rejoindre le Royaume-Uni et sont donc des nœuds de réseau majeurs. Les principaux ports de plaisance sont cependant localisés à Deauville, Ouistreham, Dieppe et permettent d'attirer un nombre important de touristes. Grâce à ces installations touristiques, la population peut jusqu'à doubler en période estivale dans ces communes littorales.

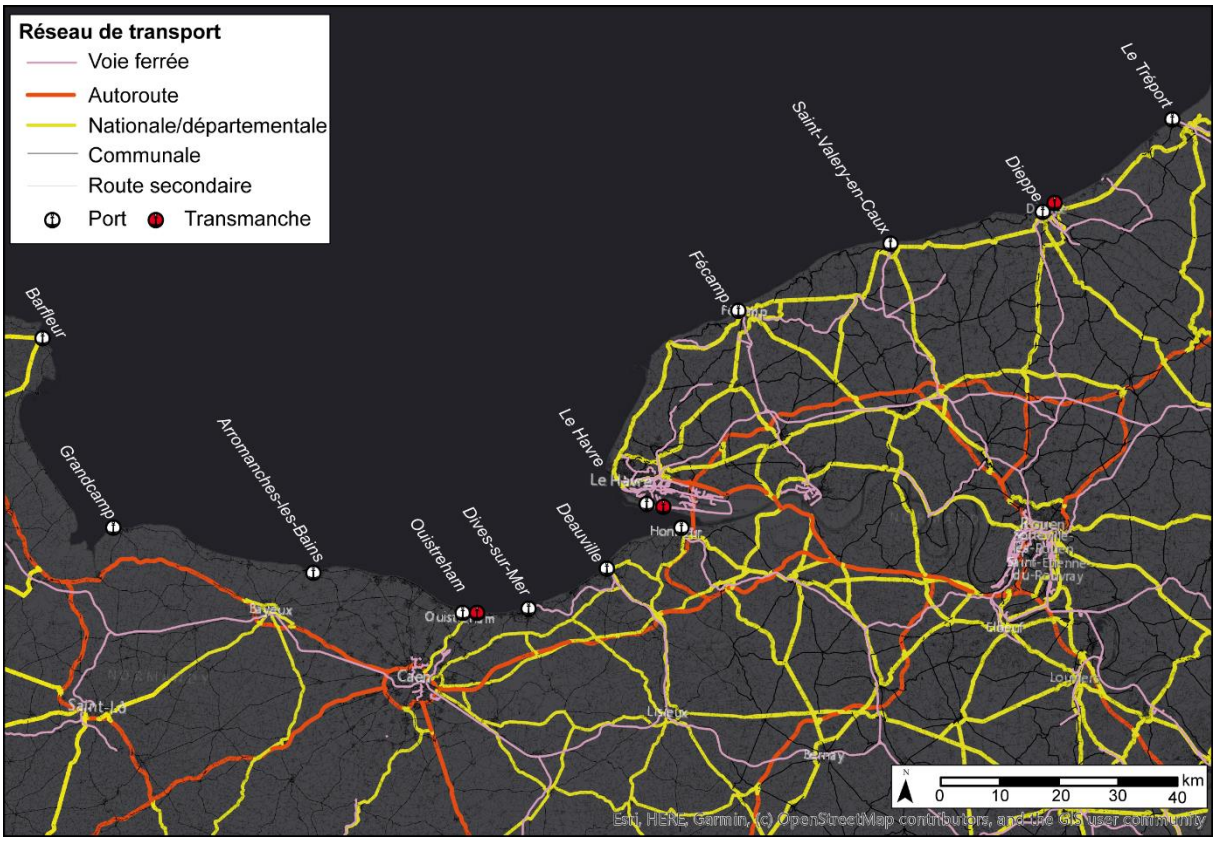


Figure 1.22 : Réseaux de transport en Normandie (données issues de l'IGN, 2017)

En dehors des lignes de bus, le réseau ferroviaire (Intercités) est le principal transport en commun de la région avec 267 km de ligne assurant la mobilité entre la capitale, les capitales régionales et les villes de tailles moyennes avec 116 gares et dessertes et une moyenne de 350 trains par jour (MTES, 2017). Le réseau routier assurant la mobilité des populations est assuré :

- Dans le Calvados (13 000 km de linéaires) par : 130 km d'autoroutes, 120 km de routes nationales, 5 700 km de routes départementales et 7 000 km de routes communales ;
- En Seine-Maritime (15 500 km de linéaires) par : 260 km d'autoroutes, 115 km de routes nationales, 5 700 km de routes départementales et 9 500 km de routes communales.

Les axes de transports permettent de supporter un réseau dense entre les grandes agglomérations et les stations balnéaires notamment entre Ouistreham, Deauville, Fécamp, Saint-Valéry-en-Caux, Dieppe et le Tréport.

1.2.6. Conclusion sur le contexte environnemental régional

La région Normandie se situe en bordure de bassin sédimentaire et dans le cadre de cette étude nous nous sommes focalisés sur deux secteurs côtiers et à falaises en particulier : le Pays d'Auge et le Pays de Caux. Le Pays d'Auge (Côte Fleurie) a la particularité d'être affecté par une multitude de phénomènes gravitaires. Le plateau est principalement par la présence de marnières (argiles à silex du Crétacé). Les versants, composés de terrain marneux du Jurassique, présentent de très fortes pentes en rupture de versant sujet aux éboulements et écroulements. Les pentes s'adoucissent ensuite et les terrains sont plus sujettes aux glissements profonds et superficiels. En façade littorale, la base du versant subit une érosion régulière par l'action de la mer. Le Pays de Caux (Côte d'Albâtre) présente des falaises subverticales entrecoupées de

vallées étroites et de valleuses. Les falaises sont essentiellement composées de craie (Crétacé supérieur) mais présentent une porosité variable rendant les falaises plus ou moins sensibles à l'érosion par la mer. En dehors des effondrements de marnière, le Pays de Caux est moins affecté par des mouvements gravitaires en arrière littoral. Cependant, d'importants et récurrents mouvements de terrain (glissements de terrain, éboulements, écroulements, chutes de blocs, …) vont se produire en façade littorale. Cette érosion du trait de côte est en lien avec des phénomènes météorologiques, hydrologiques et hydrodynamiques.

Les vallées littorales du Pays d'Auge et du Pays de Caux comprennent de nombreux vallons (secs ou drainés) dans lesquels vont s'opérer une concentration du ruissellement et pouvant se transformer en crues turbides si les surfaces sont agricoles. Cette concentration du ruissellement peut se produire durant les épisodes orageux en période hivernale (lorsque les sols sont saturés après une saison humide et froide) ou en période estivale (lorsque les sols sont secs et imperméabilisés par une saison chaude et sèche). Ces événements peuvent engendrer d'importants dégâts sur les aménagements localisés à l'exutoire des sous-bassins et dans les vallées principales. Cependant, ces épisodes orageux ont un impact très faible sur la réponse hydrologique des cours d'eau et ne sont que très rarement liés à des débordements de cours d'eau. Les débordements des cours d'eau, en lien avec un régime des bassins pluvial – océanique, se produisent principalement durant la période hivernale où les débits et les lames d'eau sont les plus forts. Ces phénomènes restent localisés dans la plaine alluviale et vont pour la plupart atteindre la basse vallée correspondant à la zone d'influence maximale de la mer. Des témoignages et rapports ont décrit l'influence de la mer sur les débordements de cours d'eau dans ces basses vallées littorales en période de tempête (blocage des écoulements par la mer).

Le blocage des écoulements par la mer est lié à des phénomènes de submersion marine par paquets de mer ou par surverse. Bien que cela ne soit pas systématique, les plus importantes submersions ont été observées durant des événements de tempêtes majeures, survenant la plupart du temps durant la période hivernale, et sont issues principalement par des flux nord-ouest. Si ces phénomènes hydrodynamiques sont bien connus, ils s'inscrivent dans un contexte de changement climatique avec des prédictions de + 1 m de niveau marin à l'horizon 2100. Il convient donc de s'interroger dès à présent sur les dynamiques entre les phénomènes gravitaires, hydrologiques et hydrodynamiques survenant sur des espaces en constante évolution. En effet, sur la frange littorale de la Normandie, les populations et axes de communication sont bien desservis entre la capitale, les grandes agglomérations, villes moyennes et stations balnéaires. Ces connexions permettent des migrations de populations fréquentes, pouvant parfois doubler le nombre de résidents présent au sein d'une commune entre la semaine et le week-end. Cet attrait pour les stations balnéaires n'est pas sans conséquence sur les logiques de répartition des aménagements et des populations où l'on observe de fortes concentrations (zone d'activité, pôle d'attractivité, etc.) dans les basses vallées et en façade littorale.

1.3. Trois sites d'étude normands adaptés aux analyses multirisques

Dans le cadre de cette thèse, ainsi que dans le programme ANR RICOCHET, trois sites d'étude (Figure I.2) présentant des enjeux socio-économiques importants et plus ou moins vulnérables selon les phénomènes naturels ont été sélectionnés à l'embouchure des rivières littorales (dans une bande littorale correspondant à l'influence maximale de la mer, pour un niveau marin centennal, soit une bande littorale d'environ 10 km) et pour lesquels de nombreuses données sont déjà disponibles grâce à plusieurs programmes de recherche (voir détails en introduction). Les limites des sites ont été ajustées en fonction d'unités hydrologiques, mais également des

limites administratives homogènes (*i.e.* territoire d'une communauté de communes) permettant une collecte d'informations plus homogènes.

Les populations se sont implantées dans des secteurs facilitant les accès à la mer, c'est-à-dire à l'exutoire des vallées, sur les versants et en façade littorale. Ces secteurs sont sujets à être impactés par différents types de phénomènes tels que les mouvements gravitaires, les inondations (marines et/ou continentales) et les crues turbides. Afin de mieux cerner l'exposition aux risques des populations localisées sur les communes littorales et rétrolittorales de ces sites d'études, il est nécessaire, d'une part, d'identifier les principaux enjeux présents sur ces sites, et d'autre part, de présenter les phénomènes hydro-gravitaires (continentaux et marins) sur la base des travaux de recherche réalisés ainsi que des différents rapports, documents administratifs et documents d'urbanisme établis (cartes d'aléas PPR, zones de susceptibilité, etc.).

La section 1.3.1 présente le site d'étude n°1 s'étendant de Auberville à Pennedepie (27 km). La section 1.3.2 présente le site d'étude n°2 s'étendant de Quiberville à Dieppe (15 km). La section 1.3.3 présente le site d'étude n°3 s'étendant de Criel-sur-Mer à Ault (12 km).

1.3.1. Site d'étude n°1 : Auberville – Pennedepie

Le long de la Côte Fleurie, le site d'étude n°1 présente une morphologie où alternent côtes à falaises et cordons littoraux sableux. Ce site d'étude intègre la communauté de communes (CC) Cœur Côte Fleurie (11 communes), une partie de la CC Pays de Honfleur – Beuzeville (quatre communes), une partie de la CC Blangy-Pont-L'Evêque Intercom (quatre communes) et une commune de la CC Normandie – Cabourg – Pays-d'Auge afin de conserver une unité hydrologique (basse vallée de La Touques) cohérente.

Depuis le XIXe siècle, ce littoral attire les particuliers, provenant en grande majorité de la capitale, et les industriels engendrant une nette artificialisation des côtes (Letortu, 2013). Marquée par une population plutôt aisée, la transformation de cet espace s'est articulée autour du développement touristique (casinos, cinémas, etc.), commercial et résidentiel (secondaire à haute valeur ajoutée). L'arrière-pays est caractérisé par une importante ruralité, avec un développement autour de l'élevage du cheval en lien avec la présence de nombreux hippodromes dont celui de Deauville. Ce site est cependant marqué par d'importants mouvements de terrain (littoraux et rétrolittoraux), d'inondations (continentales et marines) et de crues turbides dans les vallons secs et drainés.

La section 1.3.1.1 présente le contexte sociétal du site d'étude en termes de répartition de la population, d'occupation des sols et de répartition des différents types de réseaux. La section 1.3.1.2 s'intéresse plus spécifiquement aux phénomènes naturels (e.g. mouvements de terrain, inondations continentales, submersions marines, etc.) pouvant survenir sur ce site d'étude en présentant les événements historiques majeurs.

1.3.1.1. Contexte sociétal du site d'étude n°1

a. Un développement économique et démographique autour du tourisme

Sur les 20 communes de ce site, la répartition de la population est hétérogène avec des communes comprenant plus de 4 000 habitants pour les plus peuplées (Trouville-sur-Mer, Touques) contre 200 pour les moins peuplées (Saint-Pierre-Azif, Vauville) (Figure 1.23). Avec 1 050 hab./km^2, Deauville représente le moteur économique de la basse vallée de la Touques avec un développement articulé autour du tourisme de luxe (casino, hôtels de luxe, villas classées, champs de courses, ports de plaisance, palais des congrès, golfs, etc.). L'économie

touristique s'est donc largement déployée à Deauville-Trouville, tirant ainsi la croissance du territoire (Scot Nord Pays d'Auge, 2007). Pour exemple, le casino de Trouville-sur-Mer accueille chaque année près de 400 000 visiteurs.

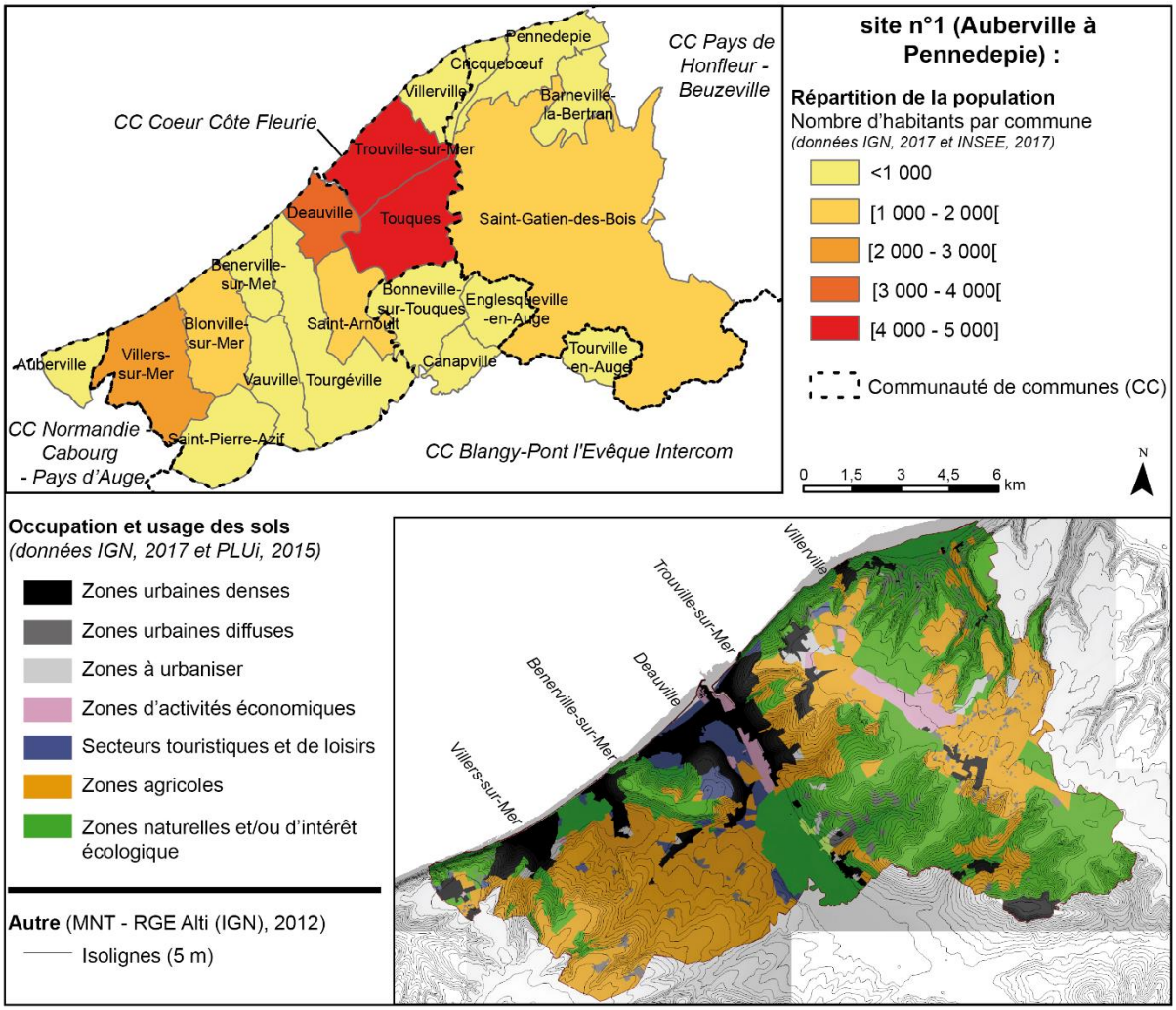


Figure 1.23 : Répartition de la population et occupation des sols sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie)

Les zones urbaines denses représentent 9 % de la surface du site (pour un total de 13 900 hectares) et sont principalement localisées en façade littorale (Villers-sur-Mer, Benerville-sur-Mer, Deauville, Trouville, Villerville). Les zones urbaines diffuses (hameaux, petits villages, etc.) et zones à urbaniser (réserve foncière du territoire à 15 et 30 ans) correspondent respectivement à 4 % et moins de 1 % de la surface totale. Les secteurs dédiés aux activités économiques et touristiques correspondent à 2 %. La zone d'activité de Deauville a la particularité d'être localisée à la fois en zone basse (en dessous d'un niveau marin centennal), dans la zone inondable de la Touques et à l'exutoire de bassins versants propices aux crues turbides (Douvinet, 2008). Protégé par une digue artificielle de 6 m de hauteur, les agglomérations de Villers-sur-Mer et de Benerville-sur-Mer sont localisées entre 50 cm et 1 m sous un niveau marin centennal (DGPR, 2011).

Le développement des activités touristiques a eu pour conséquence le développement de l'agriculture autour de l'élevage des chevaux. Principalement localisés en arrière littoral, les trois quarts des surfaces agricoles (39 % de la surface totale) se sont développés autour des

prairies temporaires et permanentes (RPG, 2016). La culture du blé tendre et du maïs représente seulement 13 % de la surface agricole restante (Figure 1.23). Les zones naturelles représentent 41 % de la surface du site et la grande majorité est classée en zone d'intérêt écologique (ZNIEFF de type I et II) dans la vallée rétrolittorale de la Touques et sur le plateau du Pays d'Auge.

Le développement autour du tourisme représente à la fois une force et une faiblesse pour ces communes comme le témoigne la commune de Villerville sur le Cirque de Graves et de Hennequeville. La fermeture du *camping des Graves* en 1982 à la suite de glissements de terrain, a engendré des pertes économiques et démographiques immédiates ainsi qu'une baisse de fréquentation pour cette commune (Lissak, 2012). La quantification de la fréquentation touristique à la journée et à la semaine, sur l'ensemble du site, et les impacts économiques restent difficiles à estimer. De plus, de nombreuses habitations ont fait l'objet d'expropriation par arrêté préfectoral et sont depuis détruites ou laissées à l'abandon.

b. Un réseau de transport et d'énergie construit autour des stations balnéaires

Le site d'étude n°1 s'inscrit dans un axe Paris-Caen avec l'A13 et dans un axe Le Havre-Honfleur-Caen avec le pont de Normandie et l'A29. Le trafic de l'autoroute A13 est dense avec 1 440 véhicules enregistrés en moyenne par jour entre Trouville-sur-Mer et Paris pour 744 véhicules par jour entre Trouville-sur-Mer et Rouen. L'autoroute A29 draine 728 véhicules par jour entre Trouville-sur-Mer et la zone urbaine du Havre. Les accès aux autoroutes sont possibles grâce aux routes départementales présentes sur l'ensemble du site (Figure 1.24). Complété par un réseau très dense de routes communales, le risque d'isolement du site en cas de rupture par un de ces réseaux est très faible.

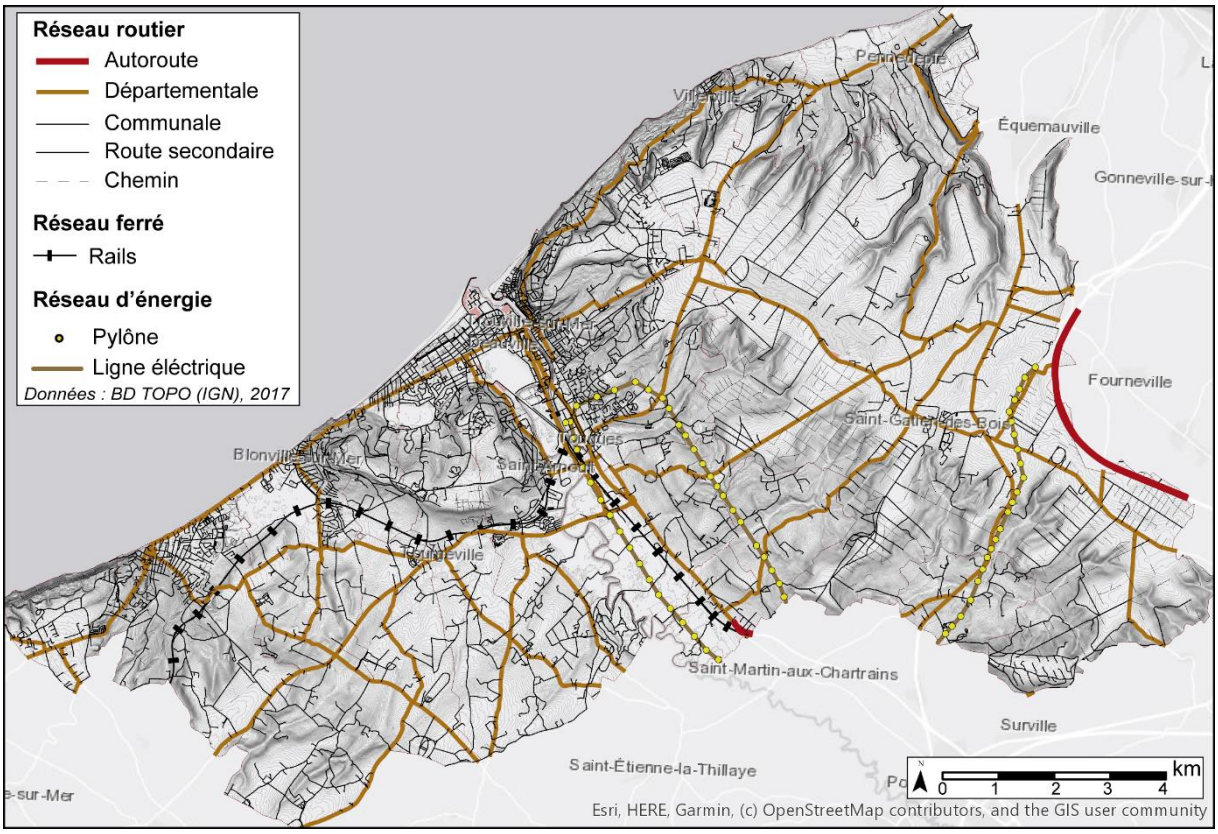


Figure 1.24 : Réseaux d'énergies et de transport sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie)

Les deux axes majeurs sont la route départementale RD 667, permettant de rejoindre l'autoroute, et la RD 74 qui mène à l'aéroport de Deauville-Normandie. Ces deux axes principaux sont complétés par une série de routes départementales le long de la côte. Quelques routes départementales secondaires permettent de desservir l'arrière-littoral. Ce réseau routier permet d'irriguer les stations balnéaires (Villers-sur-Mer, Blonville-sur-Mer, Deauville, Trouville-sur-Mer, Villerville) et le reste du territoire intercommunal. Il est complété par un réseau très dense de routes communales et chemins ruraux. La route départementale (RD 513), rejoignant Trouville-sur-Mer à Villerville par le littoral est un axe très fréquenté subissant annuellement des tassements et amorces de glissements nécessitant un entretien régulier par les communes (Lissak, 2012 ; Lissak *et al.*, 2014).

L'offre ferroviaire est concentrée sur deux axes : la ligne Paris-Deauville et la ligne Cabourg-Dives-Deauville. La gare de Deauville-Trouville est une installation stratégique et un nœud du réseau majeur du site. Elle relie quotidiennement et toute l'année les gares de Lisieux et Paris afin de répondre à la demande des actifs franciliens vers la Côte Fleurie. La fréquentation comprend une dizaine d'allers et retours quotidiens. Un pic d'utilisation de la ligne ferroviaire Cabourg-Dives-Deauville se produit pendant la période touristique estivale (juin, juillet et août) et son utilisation baisse significativement le reste de l'année.

Concernant les autres réseaux, le réseau énergétique alimentant les intercommunalités est localisé dans la basse vallée de la Touques en amont de Deauville. Les transformateurs et systèmes d'alimentation en énergie sont localisés un mètre sous un niveau marin de référence en zone basse. Une partie de l'alimentation se fait par voie aérienne (ligne électrique) et une autre partie est enterrée et suit les départementales et comprend le réseau d'alimentation et d'évacuation des eaux.

En résumé, les communes les plus peuplées du site d'étude n°1 sont celles de Trouville-sur-Mer, Touques, Deauville et Villers-sur-Mer. Ces dernières sont localisées en zone basse et partiellement inondable (Villers-sur-Mer) et à l'embouchure de La Touques (Deauville, Trouville-sur-Mer, Touques). Une grande partie du site est dédié aux activités agricoles (élevage) et classé en zones naturelles d'intérêt écologique. Principalement composés de zone pavillonnaire, les principaux centres urbains et zones d'activités sont localisés à proximité de la mer dans la plaine alluviale. Les axes de transport favorisent la circulation entre la capitale et la Côte Fleurie ce qui a pour conséquence de doubler la population en période estivale. Ces communes littorales et rétrolittorales sont affectées régulièrement par des phénomènes hydrogravitaires.

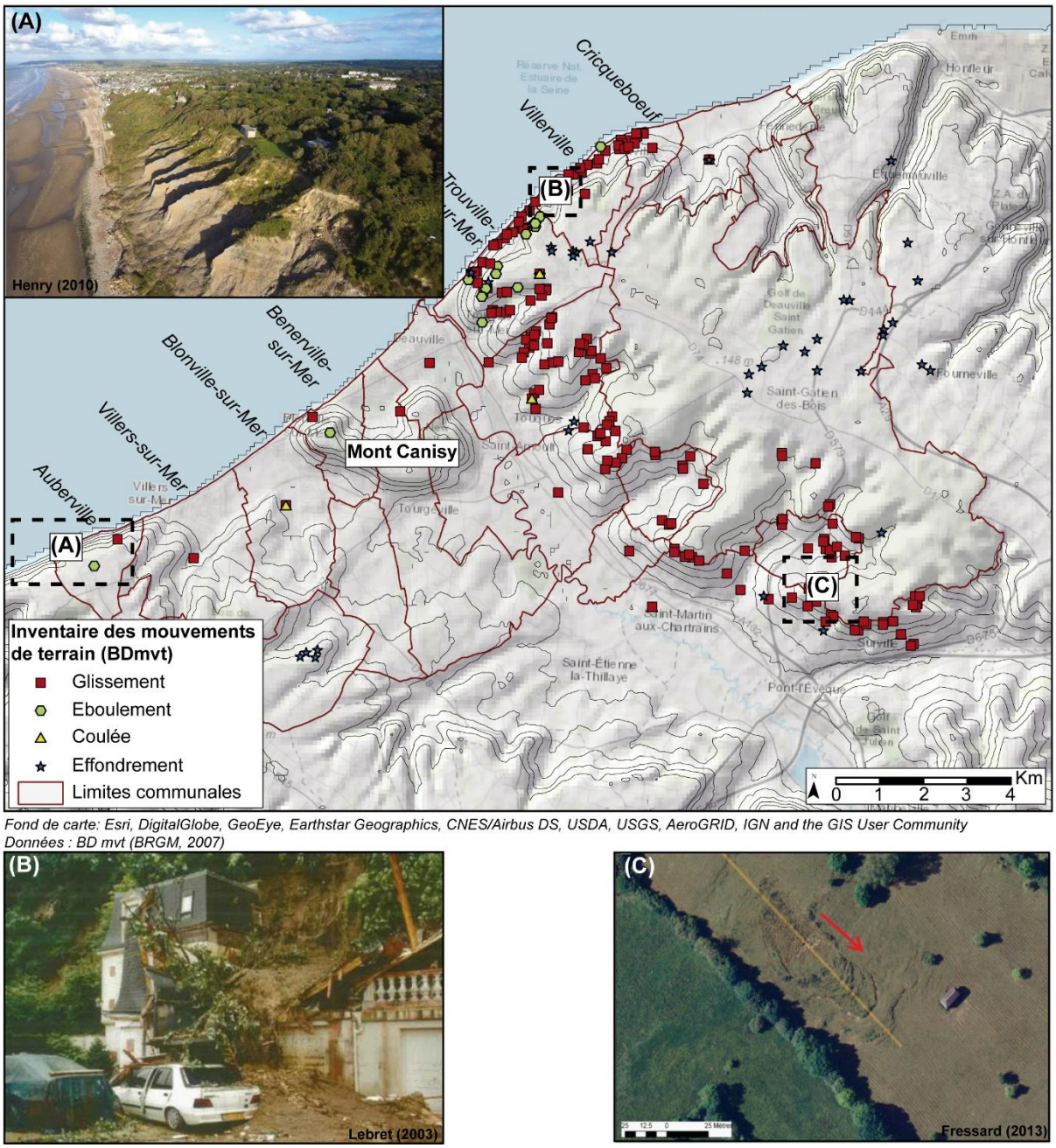
1.3.1.2. Phénomènes naturels affectant le site d'étude n°1

Les communes littorales et rétrolittorales du site d'étude n°1 sont plus ou moins régulièrement affectées par une multitude de phénomènes gravitaires et/ou hydrogravitaires (mouvements de terrain, inondations continentales et submersions marines).

a. Des mouvements de terrain parfois d'une très grande ampleur

Les mouvements de terrain se produisent principalement sur les versants (glissements, éboulements et coulées boueuses) et sur le plateau (effondrements) (Figure 1.25). Le plateau est affecté par des effondrements de terrain liés à des cavités karstiques ou anthropiques (exploitation de la craie appelée marnières pour amender les terres agricoles) (Evrard, 1987 ; Letouzé, 1993 ; Piwakowski *et al.*, 2006). Sur les têtes de versant, les pentes sont particulièrement abruptes et sont propices à des éboulements, notamment en façade littorale (A et B - Figure 1.25). En aval des têtes de versant, les mouvements de terrain sont des

déformations lentes, type reptation et solifluxion, engendrés par à une alternance gel/dégel ainsi qu'une saturation des sols (Bertrand, 1967 ; Journaux, 1971 ; van Vliet-Lanoë, 1987 ; Bertran, 2004). Les déformations lentes sont liées à des glissements superficiels translationnels (de berges), activés le long des sources et des cours d'eau (C - Figure 1.25), et à des glissements profonds de type rotationnel, translationnel et complexe (Fressard, 2013 ; Fressard *et al.*, 2016).

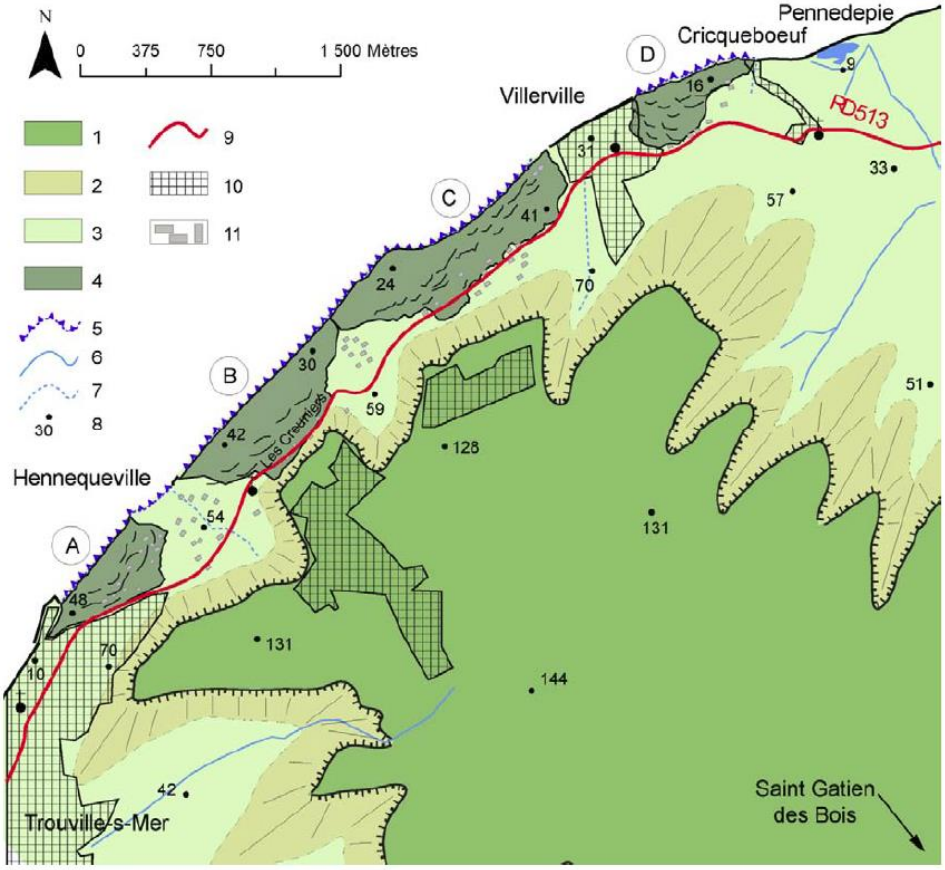


(A) Falaises des Vaches Noires sujettes à des glissements de terrain et des coulées boueuses et à un recul progressif du trait de côte ; (B) glissement de terrain survenu sur la commune de Villerville ; (C) glissement superficiel (1 à 2 m de profondeur) du Bas-Verger.

Figure 1.25 : Inventaire des mouvements de terrain sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) (BDmvt - BRGM, 2007)

En partie littorale, les falaises des Vaches Noires se présentent sous la forme de badlands et sont issues d'une érosion différentielle entre des calcaires-craies et des marnes (Figure 1.25– A).

Des glissements rotationnels et éboulements en amont des falaises apportent régulièrement des matériaux dans des ravines qui sont ensuite remobilisés sous forme de coulées boueuses et déplacés jusqu'à l'escarpement basal soumis à une érosion marine (Roulland *et al.*, 2019). Le Mont Canisy (localisé entre Benerville-sur-Mer et Tourgéville) se caractérise par un escarpement instable en pied de falaise et des instabilités plus marquées liées à des chutes de blocs, des petits glissements superficiels et des coulées de boues au nord et à l'est (Maquaire, 2000).



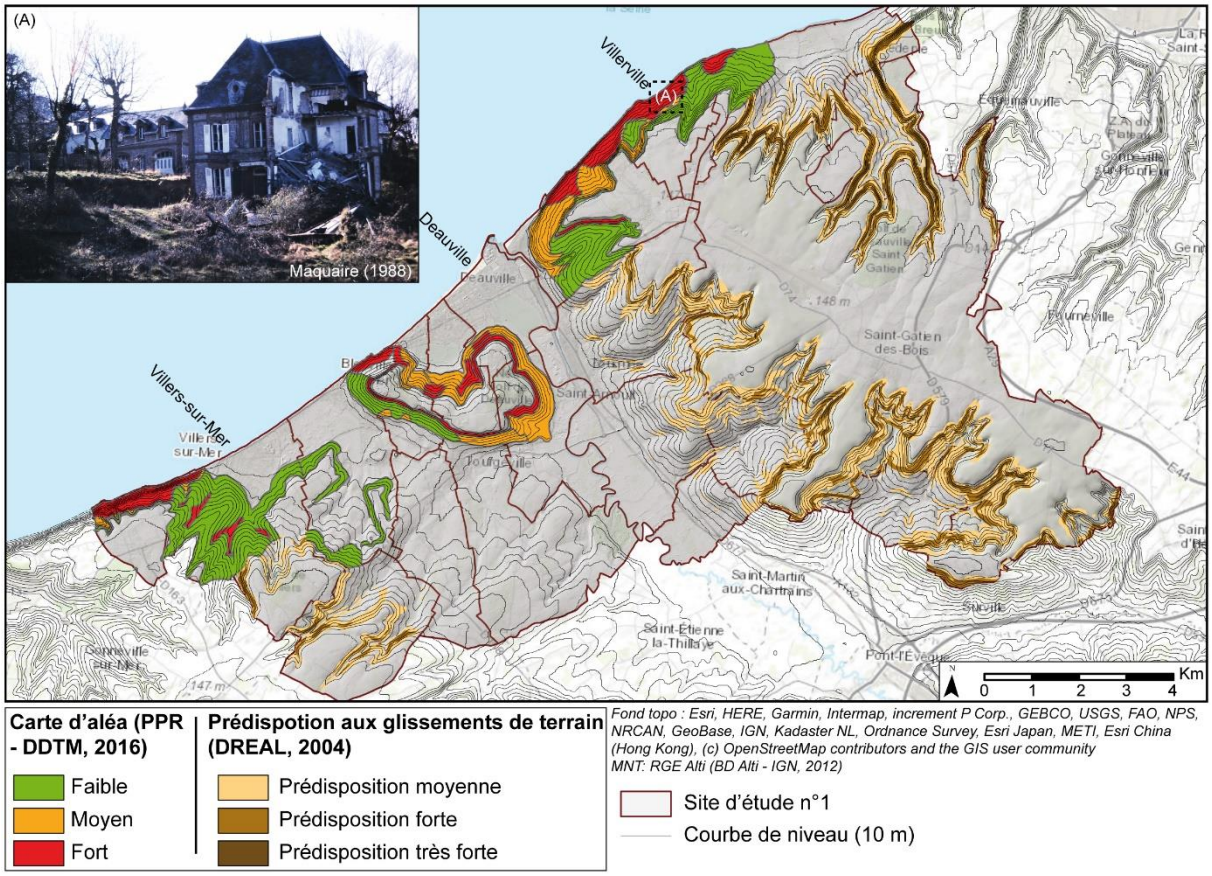
(A) Chant des Oiseaux ; (B) Hennequeville ; (C) Cirque des Graves ; (D) Fosse du Macre. 1/ Plateau d'Auge ; 2/ Talus en forte pente ; 3/ Talus en faible pente ; 4/ Glissement actif ; 5/ Falaise ; 6/ Réseau hydrographique pérenne ; 7/ Réseau hydrographique non pérenne ; 8/ Point côté ; 9/Route principale, 10/ Bâti concentré ; 11/ Bâti dispersé.

Figure 1.26 : Localisation des quatre zones instables entre Trouville-sur-Mer et Cricquebœuf (issu de Lissak, 2012)

Entre Trouville-sur-Mer et Cricquebœuf, les versants littoraux sont affectés par quatre zones instables comprenant, d'ouest en est, le Chant des Oiseaux, Hennequeville, le Cirque des Graves et les Fosses du Macre (Maquaire, 1990) (Figure 1.26). Chacune de ces zones se présente sous la forme : (1) d'une zone d'affaissement en amphithéâtre, (2) d'une zone de basculement en gradin typique des glissements rotationnels profonds, (3) d'une zone de glissements superficiels translationnel en aval et (4) d'une zone d'accumulation en pied du glissement peu à peu remanié par la mer (Lissak, 2013 ; Lissak *et al.*, 2014).

Ces déformations et glissements ont donné lieu à des analyses de susceptibilité par les chercheurs (Lissak, 2012 ; Fressard, 2013). Afin d'obtenir une vision globale des potentiels secteurs soumis à des mouvements gravitaires, le projet de zonage de l'aléa aux glissements de terrain (DDTM, 2016) est présenté ci-après à titre d'illustration. Ce projet porte essentiellement

sur la partie littorale. Dans la partie continentale, et également à titre d'illustration, le zonage de prédisposition aux glissements de terrain réalisé par la DREAL (2004) est présenté ci-après (Figure 1.27).



(A) Habitations présente sur le Cirque des Graves endommagées par les glissements de terrain de 1982.

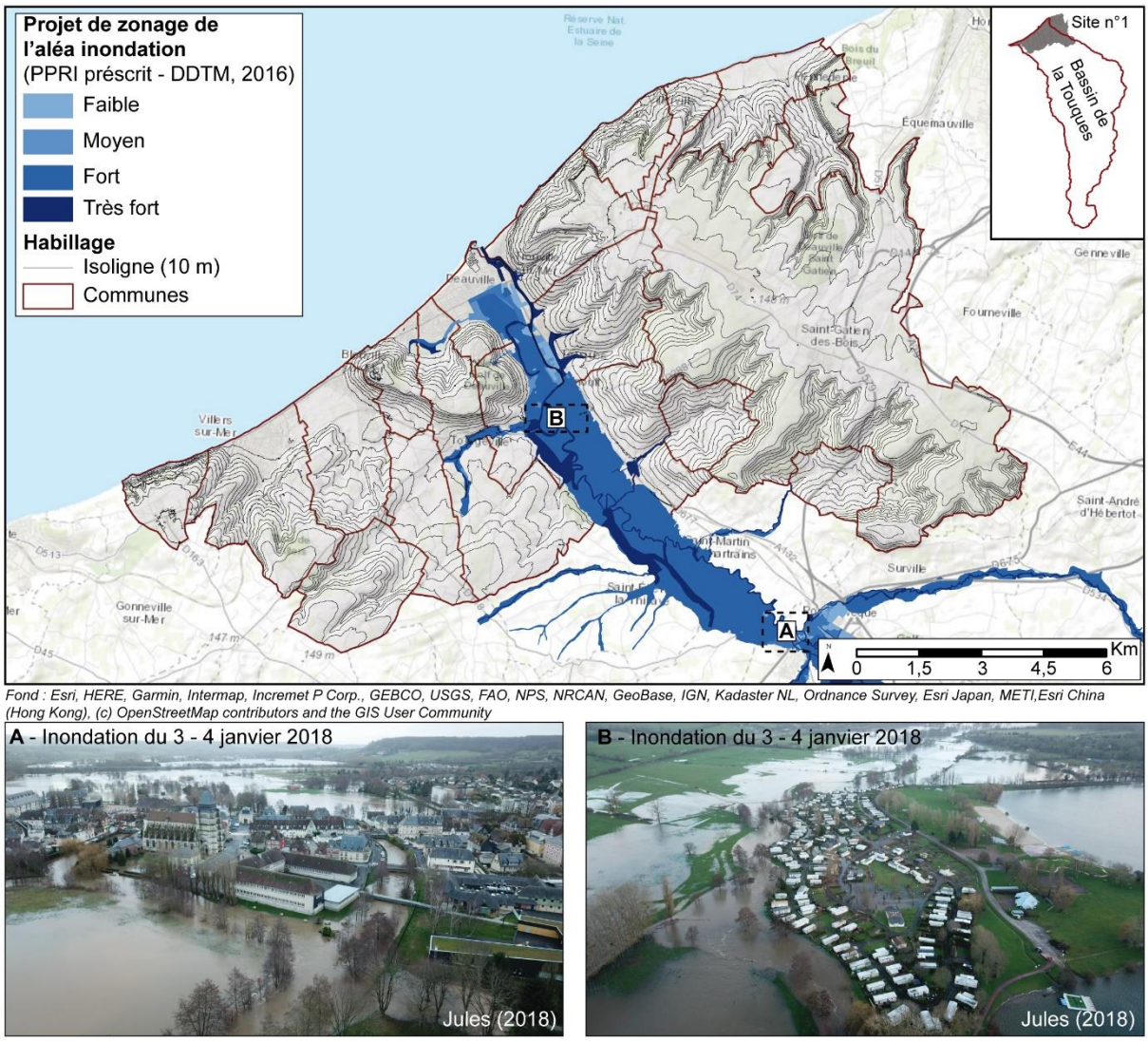
Figure 1.27 : Projet de zonage des aléas mouvements de terrain tiré des PPRmvt et zonage de la prédisposition aux glissements de terrain issue de la DREAL Normandie, 2004

Le glissement le plus marquant s'est produit en janvier 1982 où 122 bâtiments ont été impactés dans le Cirque des Graves dont 80 ont été détruits (Maquaire, 1990 ; Lissak, 2012). Environ 78 % sont des bâtiments résidentiels, 16 % des annexes et 5 % des bâtiments de loisirs (Figure 1.27 – photo A). Le glissement a eu pour conséquence le déménagement du camping des Graves engendrant alors une baisse d'activité économique et démographique pour la commune de Villerville. Cet événement est considéré comme la plus importante réactivation contemporaine. Cette réaction en 1982 a engendré d'importants reculs et l'affaissement de l'escarpement principal du Cirque des Graves et des Fosses du Macre. Malgré les études déjà publiées, ou en cours d'instruction, des travaux doivent encore être réalisés afin d'améliorer la précision et la prédiction des mouvements gravitaires dans les secteurs littoraux et rétrolittoraux (thèse en cours de Guillaume Thirard financée par le projet ANR RICOCHET).

b. Les inondations continentales

De multiples et récurrentes inondations dans la basse vallée de la Touques, donnant lieu à la prescription ministérielle d'arrêtés CatNat (Catastrophes naturelles), ont amené les communes à se doter d'un PPRi (DDTM 14, 2016). Un des seuls documents disponibles sur l'emprise de ces

inondations (crues turbides et débordement de cours d'eau) est issu du projet de zonage de l'aléa inondation réalisée par la DDTM 14 (2016) (Figure 1.28).



(A) Inondation des 3 et 4 janvier 2018 à la suite de fortes précipitations et de la tempête Eleanor à Pont-L'Évêque ; (B) inondation des 3 et 4 janvier 2018 s'étant propagée sur le camping *La vallée de Deauville*.

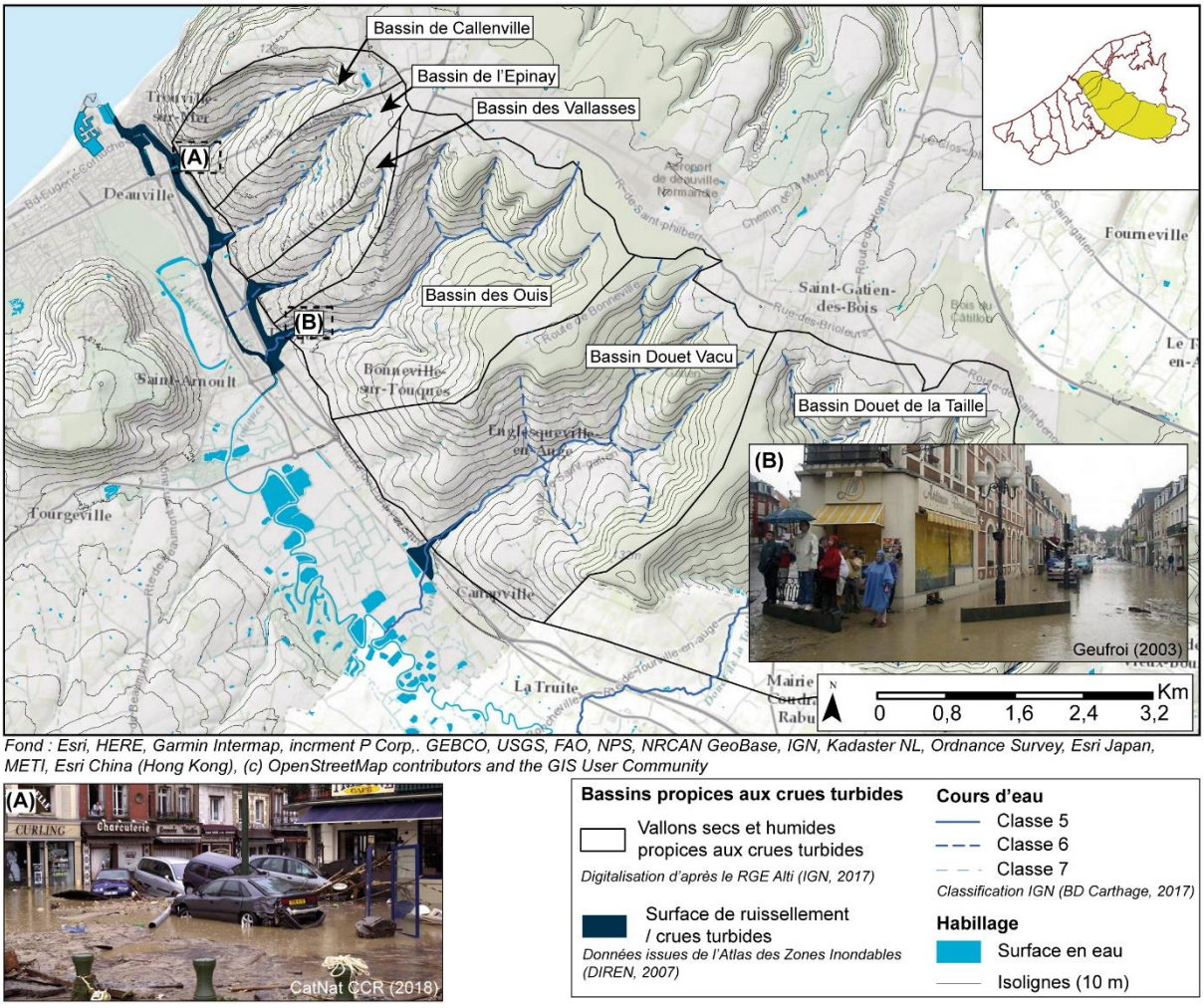
Figure 1.28 : Projet de zonage de l'aléa inondation dans la basse vallée de la Touques (données issues du PPRI – DDTM 14, 2016)

Les rapports mentionnent que les lames d'eau dans la basse vallée sont fortement influencées par les coefficients de marée et se font ressentir jusqu'à Pont-l'Évêque soit jusqu'à 11 km à l'intérieur des terres.

Actuellement, aucun événement de référence (période de retour centennal) n'a pu être observé et une approche hydromorphologique est utilisée pour identifier et caractériser l'aléa. À partir de 12 laisses de crues, une ligne d'eau de référence est définie : cinq sont issues de l'inondation de janvier 1965 (Touques), trois de novembre 1994 (Calonne), quatre du 13 août 1997 (Touques) et 12 de l'inondation de novembre 2000.

Les bassins de rive droite de la basse vallée de la Touques sont particulièrement sujets aux crues turbides (Figure 1.29). A noter que les vallons de ces bassins sont le plus souvent secs (écoulements intermittents). Le dernier événement majeur recensé sur ce site date du 1er juin

2003 où quatre crues turbides se sont déclenchées simultanément dans le bassin de Callenville, de l'Epinay, des Vallasses et des Ouïs (Bernard, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2005 ; Douvinet, 2008).



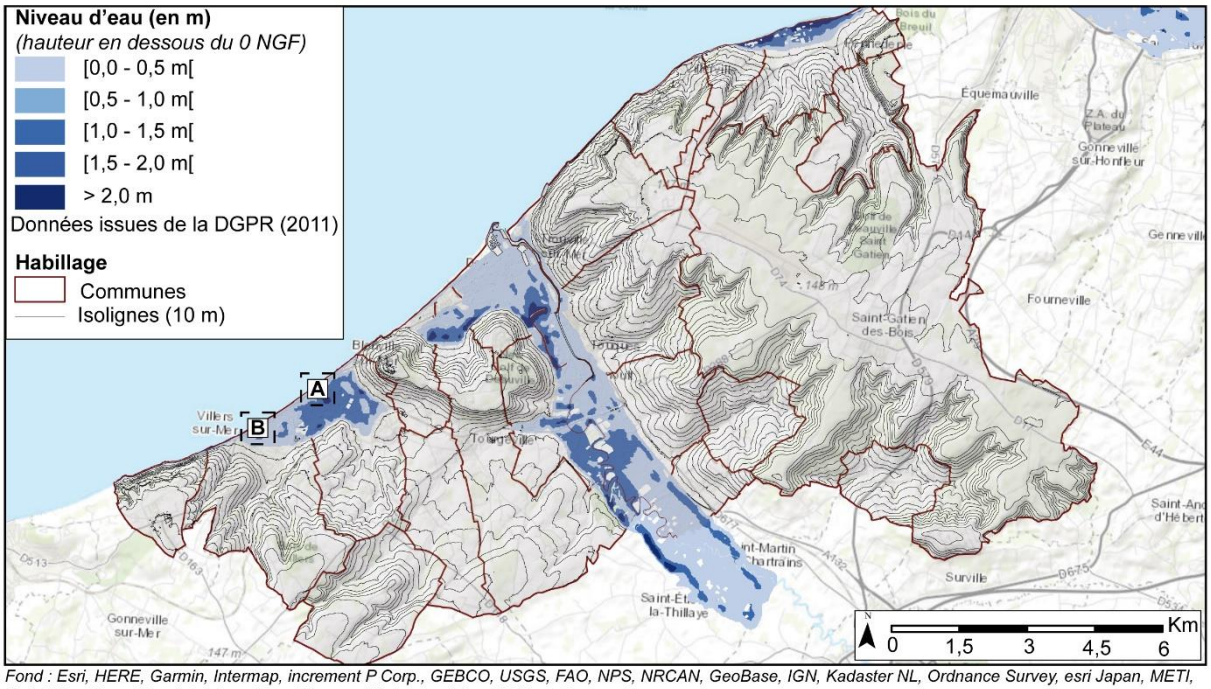
(A) Conséquences des crues turbides survenues le 1er juin 2003 à l'exutoire du bassin de Callenville et ayant rejoint le port de Trouville-Deauville ; (B) Conséquences des crues turbides survenues le 1er juin 2003 à l'exutoire du bassin des Ouïs sur la commune de Touques.

Figure 1.29 : Localisation des bassins propices aux crues turbides dans la basse vallée de la Touques (digitalisation des bassins à partir du MNT à 5 m, données issues de la DDTM, 2016)

La cause principale de ces crues provient d'un cumul de 129,7 mm de précipitation en 15 h, avec une phase de préparation de 37,4 mm le matin ayant eu pour conséquence de saturer rapidement les sols. Des effets d'embâcles issus de débris végétaux, mais également de constructions humaines (chute de murs, etc.), ont eu un effet aggravant à l'exutoire des bassins. Sur le bassin des Ouïs, les embâcles ont généré une vague de crue allant jusqu'à 1,50 m de hauteur d'eau en plein centre-ville (Touques). À l'exutoire du bassin de Callenville, à Trouville-sur-Mer, les écoulements se sont propagés jusqu'au port (Delahaye, 2008 ; Douvinet *et al.*, 2015). Cet événement est le plus destructeur enregistré avec un mort et un coût total de 5,3 millions d'euros de dégâts (DDTM, 2012).

c. *Des submersions marines rares*

Le site d'étude n°1 est épisodiquement soumis à des submersions marines. Pour qu'elles se produisent, le niveau marin doit dépasser une côte de 4,5 m NGF à Villers-sur-Mer, Benerville-sur-Mer, Deauville ou Trouville-sur-Mer (DDTM, 2016). Contrairement aux sites à falaises de Seine-Maritime (site d'étude n°2 et n°3), le site d'étude n°1 bénéficie d'une protection partielle des vents et houles par la Manche en raison de sa position à l'estuaire de la Seine. Bien que ponctuellement, l'action des vagues vient endommager les infrastructures en façade littorale et éroder les pieds de falaises, les problèmes de submersion seraient principalement liés à un haut niveau marin et moins à des submersions par paquet de mer (Fisson *et al.*, 2014 ; Fisson et Lemoine, 2016). La plaine alluviale de La Touques et du marais de Villers-sur-Mer (localisé derrière la digue de protection sur la photo A – Figure 1.30), se trouvent ainsi en dessous des 5,5 m NGF correspondant à un niveau marin centennal plus un mètre d'élévation du marin (Figure 1.30).



Fond : Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors and the GIS User Community

(A) Digue de protection et aménagement présents le long de la digue entre Villers-sur-Mer et Benerville-sur-Mer ; (B) Submersion par paquet de mer durant la tempête Eleanor le 3 janvier 2018 à Villers-sur-Mer.

Figure 1.30 : Cartographie des zones basses (*i.e.* zone topographique en dessous d'un niveau marin de référence) sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) (données issues de DGPR, 2011)

En cas de franchissement par la mer, les zones basses (*i.e.* secteurs topographiques en dessous d'un niveau marin de référence) vont se remplir comme une cuvette engendrant des problèmes d'évacuation de ces eaux. Une cartographie des zones basses, établis en 2009 et mis à jour en 2011, permet de localiser les secteurs soumis aux submersions marines. L'influence de la mer dans le site d'étude n°1 peut donc se faire ressentir jusqu'à 10 km dans les terres. Ces problèmes de submersions marines coïncident généralement avec des problèmes de débordement de La Touques comme ce fut le cas les 3 et 4 janvier 2018 durant la tempête Eleanor. Une des dernières tempêtes majeures historiques ayant engendré des submersions marines significatives date du 26 février 1990. Durant cette tempête, de nombreuses habitations sont retrouvées sous les eaux à Trouville-sur-Mer, Deauville et Villers-sur-Mer (DREAL Normandie, 2012). Plus récemment, la tempête Eleanor à impacté les côtes du Calvados les 3 et 4 janvier 2018. Cet événement a engendré des franchissements par la mer (coefficient de marée de 108) ainsi qu'une érosion (modérée) des digues de protection (ROL, 2018). Cet événement est concomitant avec des débordements de cours d'eau majeur dans La Touques que l'on peut pour l'instant supposer, lié par un effet de blocage partiel des écoulements par la mer.

En résumé, le site d'étude n°1 est affecté par une multitude de mouvements de terrain liés des effondrements sur le plateau et à différents types de glissements profonds et superficiels sur les versants littoraux et arrières littoraux. Les nombreux vallons secs et drainés (en rive droite de La Touques) sont particulièrement propices aux crues turbides et à la concentration du ruissellement. Des débordements de cours d'eau se produisent régulièrement dans la basse vallée de La Touques et ces débordements vont par moment être concomitants à de hauts niveaux marins. Bien que ce site soit partiellement à l'abri des courants de marée et des flux de nord-est, en raison de sa position à l'estuaire de la Seine, le site est ponctuellement affecté par des submersions marines engendrées principalement par des flux d'ouest.

1.3.2. Site d'étude n°2 : Quiberville à Dieppe

Le site d'étude n°2 s'étend de Quiberville à Dieppe, sur la Côte d'Albâtre, et sur un linéaire de côtier de 15 km de falaises subverticales (cohérentes) entrecoupées de vallées étroites. Le site d'étude n°2 intègre la communauté d'agglomération de la Région Dieppoise (14 communes) et une partie de la CC Terroir de Caux (sept communes) sur une bande littorale d'une dizaine de kilomètres (influence maximale de la mer pour un niveau marin centennal), soit un total de 21 communes. Ce site alterne entre des falaises cohérentes subverticales (simples et complexes - Cap d'Ailly-) et des vallées encaissées (La Saâne, La Scie, L'Arques). La présence de ces falaises subverticales rend les accès à la mer plus difficiles et les aménagements se sont développés en bord de falaises et dans les fonds de vallées à l'exutoire des bassins versants (Letortu, 2013).

La section 1.3.2.1 présente le contexte sociétal du site d'étude n°2 en termes de répartition de la population, de l'occupation des sols et des différents types de réseaux. La section 1.3.2.2 s'intéresse plus spécifiquement aux phénomènes pouvant survenir sur ce site d'étude en présentant les événements historiques majeurs.

1.3.2.1. Contexte sociétal du site d'étude n°2

a. Des importants enjeux économiques et fortes densités des populations localisées en fond de vallée et front de mer

Avec 2 480 hab./km² contre 198 hab./km² en moyenne en Seine-Maritime, la densité de population à Dieppe est 12 fois supérieure à celle du département (INSEE, 2017) (Figure 1.31).

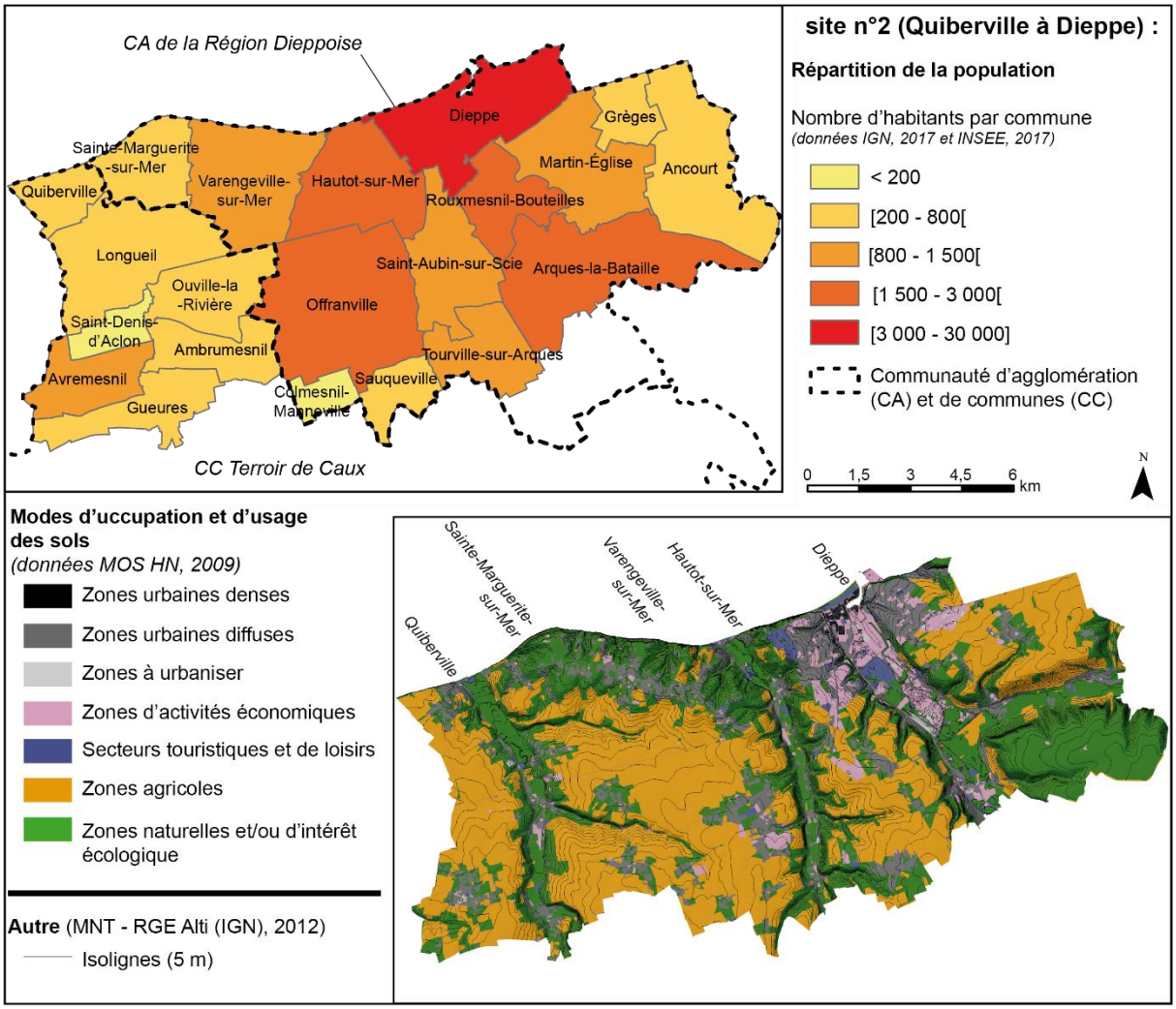


Figure 1.31 : Répartition de la population et occupation des sols sur le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe)

Induit par un effet de périurbanisation, cette surpopulation a eu pour conséquence d'accroître la densité des populations des communes adjacentes dans les vallées de l'Arques (Rouxmesnil-Bouteilles et Arques-la-Bataille) et de la Scie (Hautot-sur-Mer et Offranville). Sur le plateau de Caux, et plus particulièrement en arrière littoral, la population reste faible avec des communes inférieures à 200 habitants.

Les zones urbaines et bâties représentent 12 % de la surface totale (16 000 hectares) du site d'étude n°2. La plus grande concentration d'espace bâti est localisée à l'exutoire de la basse vallée de l'Arques, sur la commune de Dieppe (Figure 1.31). Les zones d'activités et réseaux de communication (6 %) sont également localisés sur la commune de Dieppe et dans la vallée en arrière littoral (Rouxmesnil-Bouteilles et Arques la Bataille). Une zone d'activité économique majeure accueille des usines automobiles (Renault, Citroën, etc.), des industries agroalimentaires (Nestlé, Leclerc, etc.), des centres commerciaux et d'activités (Leclerc, Intermarché, etc.) et des centres de service (caserne des pompiers, centre administratif, etc.). Cette zone d'activité est localisée en zone basse (-1,5 m d'eau par rapport à un niveau marin centennal) et en zone inondable par l'Arques et ses affluents. Les vallées de la Scie (Hautot-sur-Mer) et de la Saâne (Quiberville) sont urbanisées en façade littorale et sur les versants. Cependant, en arrière littoral, la grande partie de la plaine alluviale est laissée à l'état naturel. Le plateau de Caux est composé essentiellement de terres agricoles (66 %) avec une majorité

de terres arables (42 %) et de prairies (23 %). Les cultures permanentes sont minoritaires (1 %). Les terres arables sont constituées en grande partie de blés tendres (30 %), de plantes à fibres (12 %), de colza, maïs, orge et cultures industriels (24 %) (RPG, 2016). Les prairies permanentes représentent 25 % de l'espace agricole. Les surfaces naturelles, présentes sur le Cap d'Ailly, les fonds de vallée et au sud-est du plateau, représentent 15 % de la surface du site.

b. Un réseau de transport et d'énergie concentré

La région dieppoise possède trois axes de communication majeurs. À l'est, la RD 925 relie Dieppe à Eu ainsi qu'à Saint-Valery-en-Caux par cette même départementale (Figure 1.32).

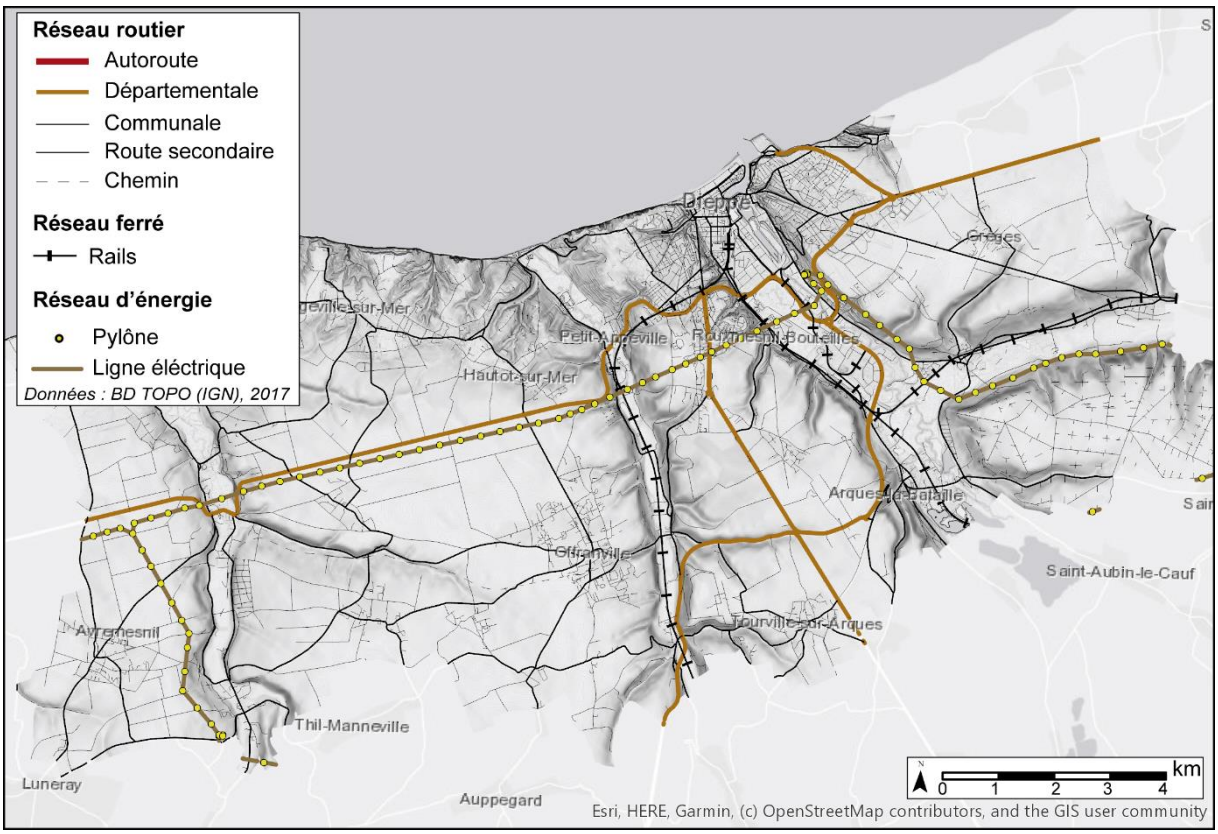


Figure 1.32 : Réseaux d'énergies et de transport sur le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe)

Au sud-est, la RD 920 relie Dieppe à Rouen. Les routes communales sont nombreuses, mais tendent à suivre les talwegs des sous-bassins faisant alors office de rampe de lancement au ruissellement (Delahaye, 2003 ; Douvinet *et al.*, 2015). Le risque de blocage par coupure d'un réseau reste faible, mais peut engendrer des trajets plus longs pour les secours en période de crise.

La ville de Dieppe est directement reliée à Paris et à Rouen par le réseau TER Normandie. La fréquentation de cette ligne s'élève à plus de 500 000 voyageurs par an avec un pic de fréquentation en période estivale. Ce pic de fréquentation se produit principalement dans la ville de Dieppe et est lié au tourisme. Cette attraction touristique est dû à la présence d'une station balnéaire composée d'un casino, d'un golf, d'un hippodrome ainsi que d'un important port de plaisance. La présence de ce port a permis le développement de la pêche (principalement fournisseur de Paris et Rouen), d'aménagements touristiques et commerciaux ainsi que l'aménagement d'un ferry (Transmanche) permettant de rejoindre l'Angleterre.

Une station ferroviaire a également été aménagée près de la zone industrielle de Dieppe et le réseau ferroviaire est localisé en grande partie dans les fonds de vallée et à l'exutoire des sous-bassins versants entraînant épisodiquement des coupures du trafic (InfoNormandie, 2018). Les réseaux d'énergie principaux suivent les axes ferroviaires et les axes routiers majeurs (notamment sur la RD 925). Le réseau électrique aérien est épisodiquement impacté, notamment durant les événements tempétueux, engendrant alors des coupures de réseaux privant d'électricité l'ensemble des vallées.

Ce site est marqué par une forte densité de population et une occupation urbaine des sols importante à Dieppe dans la vallée de l'Arques ainsi que sur les versants et près des escarpements des falaises. Contrairement à la Côte Fleurie, la Côte d'Albâtre est beaucoup plus exposée aux flux d'ouest et courants de marée entraînant une exposition accrue aux submersions marines dans les fonds de vallées. Ces inondations par la mer sont également couplées à des problèmes de ruissellement sur des vallons fortement anthropisés (imperméabilisant les sols) ainsi que des débordements lents de cours d'eau.

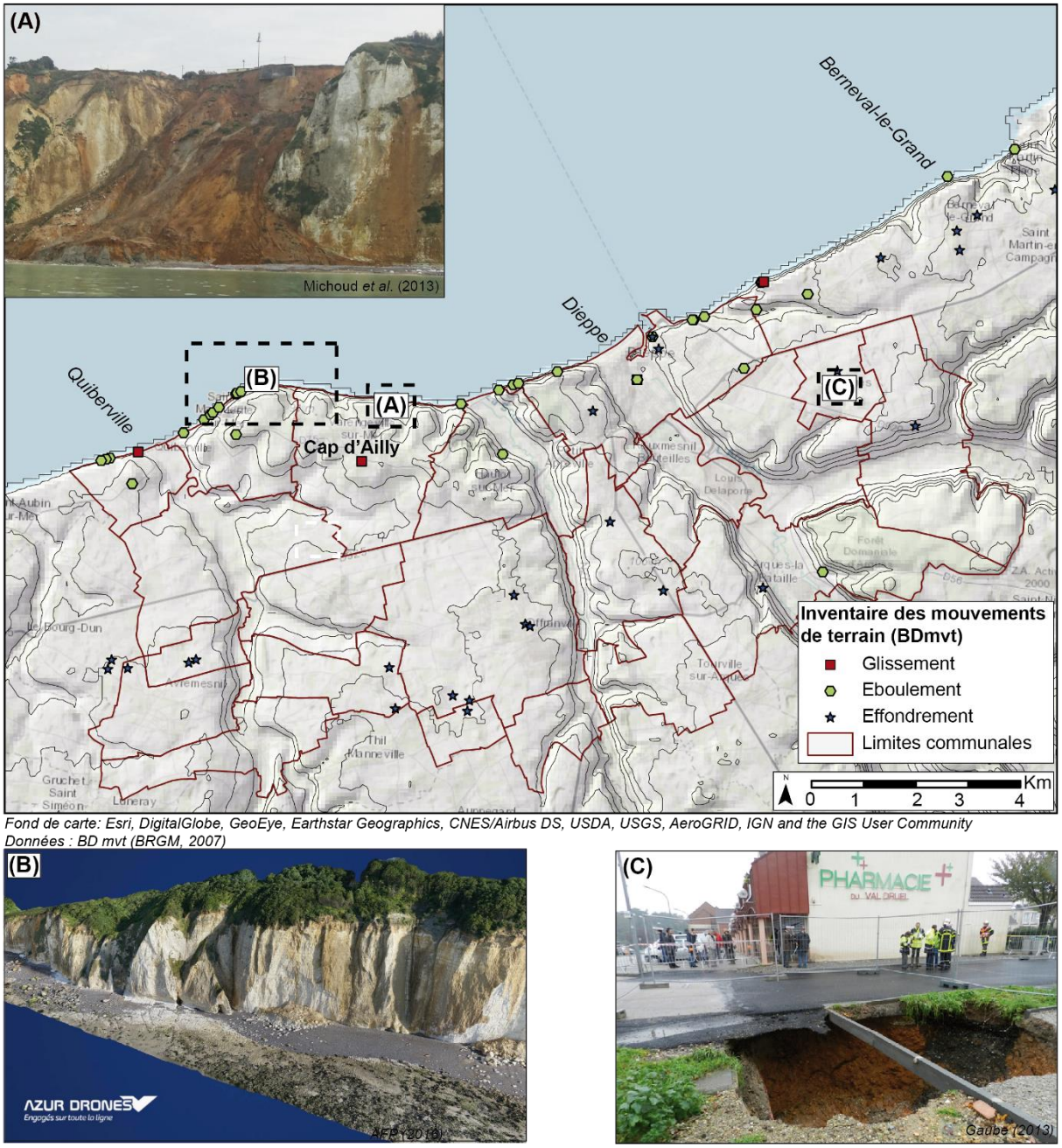
En résumé, la commune de Dieppe est la plus peuplée du site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe). Le développement de cette commune, localisée à l'exutoire de la vallée de L'Arques, est lié aux activités industrielles et commerciales (au sud de Dieppe) ainsi qu'à l'activité touristique engendrée par le port de Dieppe (présence du Transmanche). La zone urbaine de Dieppe est donc très dense et composée aussi bien de résidences individuelles (pavillons) et collectives (immeubles de plusieurs étages). En dehors de la commune de Dieppe, les zones urbaines sont diffuses et composées majoritairement de zones d'habitat de type pavillonnaire. La grande majorité du site (66 %) est dédiée aux activités agricoles (localisées sur le plateau).

Comme nous allons maintenant le préciser ces aménagements situés en bordure de falaises sont potentiellement affectés par un recul des falaises lié aux éboulements et glissements de terrain et d'effondrement (marnières) sur le plateau, tandis que les aménagements situés dans les fonds de vallées peuvent être affectés par des phénomènes de concentration du ruissellement, des débordements de cours d'eau et des submersions marines.

1.3.2.2. Phénomènes naturels affectant le site d'étude n°2

a. Des mouvements de terrain localisés sur les falaises

Entre Quiberville et Dieppe, les falaises sont sujettes à des éboulements rocheux et glissements fréquents (Figure 1.33) entraînant un taux de recul moyen compris entre 30 et 40 cm par an (Costa, 1997 ; Costa *et al.*, 2019). Sur le plateau (partie continentale), les principaux mouvements de terrain sont liés à des effondrements de marnière (C – Figure 1.33). À l'heure actuelle, aucune cartographie des zones de susceptibilité aux mouvements de terrain (en zone continentale) n'est disponible, en dehors d'une cartographie des zones de présomption des cavités souterraines (BRGM, 2007).



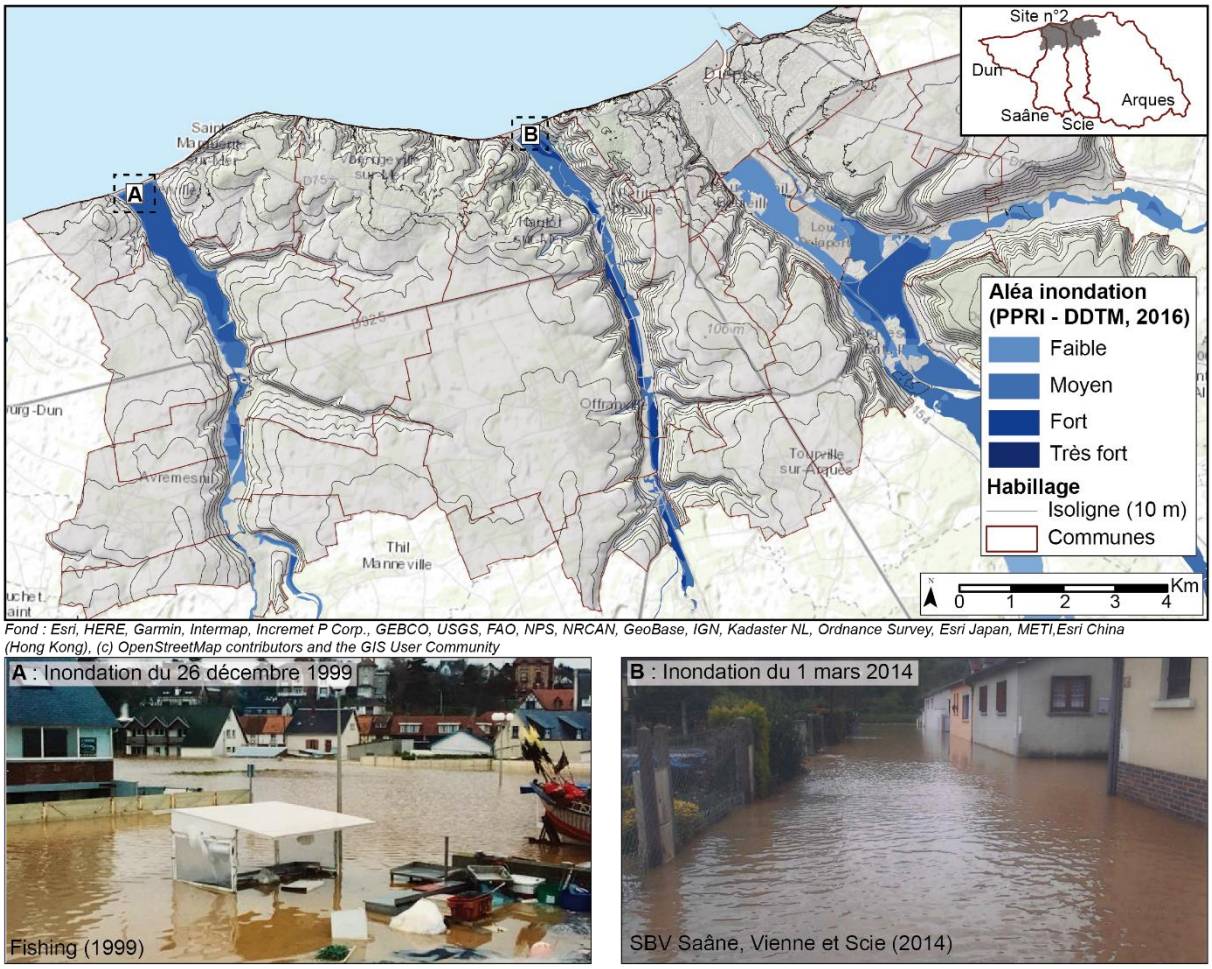
(A) Glissement de terrain survenu en décembre 2012 à l'ouest de Dieppe entraînant d'importants dégâts ; (B) Imagerie drone des falaises subverticales complexes du Cap d'Ailly ; (C) Exemple d'effondrement de marnière.

Figure 1.33 : Inventaire des mouvements de terrain sur le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) (BDmvt – BRGM, 2007)

L'événement le plus marquant s'est produit en décembre 2012 où environ 100 000 m³ de matériaux ont été brutalement glissés à l'ouest de Dieppe à la suite d'un éboulement (photo A – Figure 1.33) (Michoud *et al.*, 2015). Ce glissement a eu pour conséquence la destruction complète d'une maison, l'expropriation et la relocalisation de deux habitations adjacentes, ainsi que l'obligation du déplacement de la route (la RD 75). Depuis 2016, cette route est entièrement fermée à la circulation et ne pourra être reconstruite que lorsque les équipements du centre sportif du stade Mérault auront été relocalisés au stade Delaune à Dieppe (BRGM, 2015).

b. Les inondations continentales

La crue de référence pour les bassins de la Saâne, de la Scie et de l'Arques est la crue du 26 décembre 1999 caractérisée par une période de retour entre 50 et 100 ans (DDTM, 2012, 2016). Durant ce mois de décembre, les précipitations se sont élevées à 230 mm, contre 80 - 90 mm en temps normal, et un tiers (68,2 mm) a été précipité en trois jours. Les débits enregistrés se sont élevés à 30 $m^3.s^{-1}$ ce qui a permis un débordement de l'ensemble des bassins (Figure 1.34).



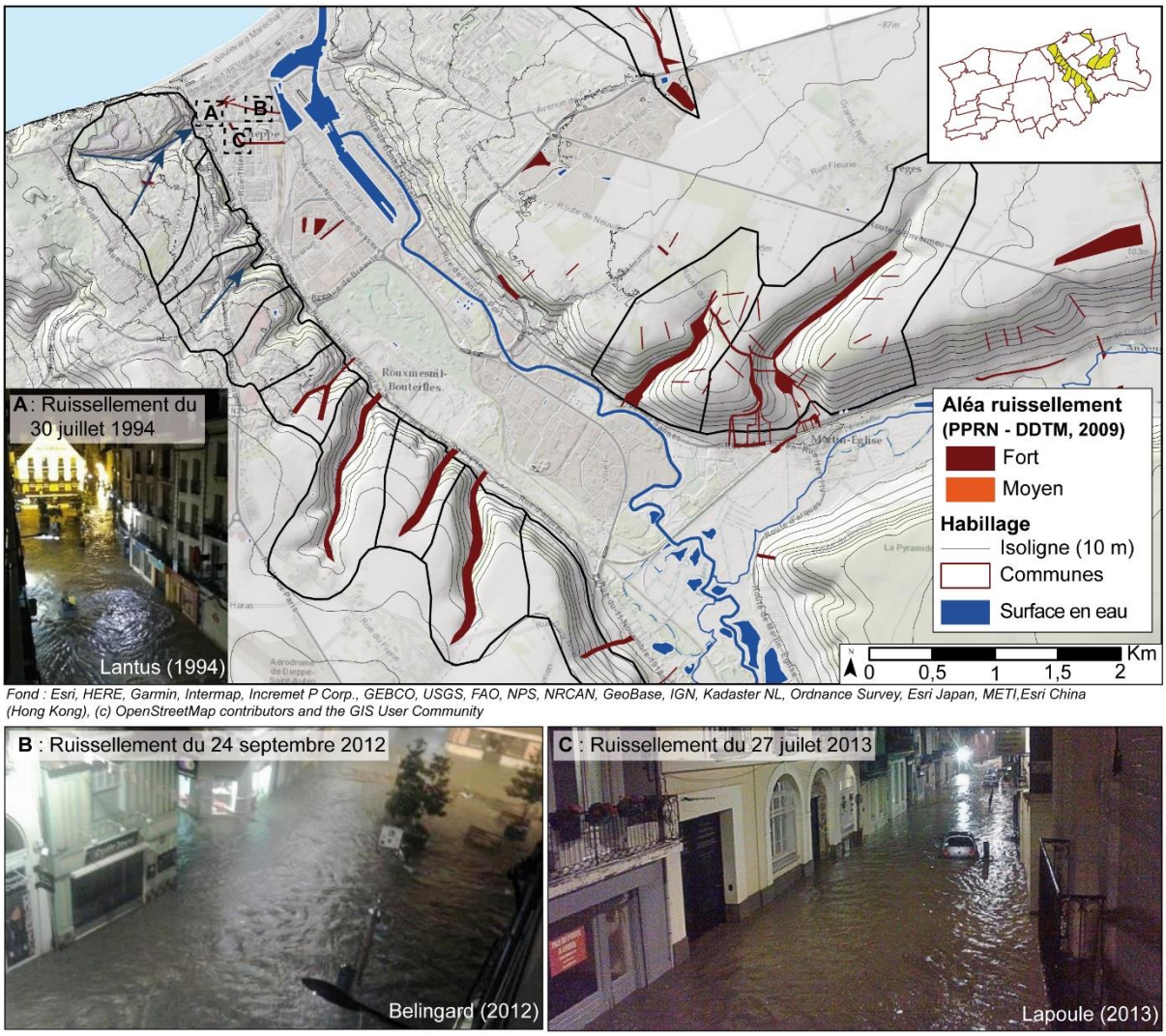
(A) Inondation à l'exutoire de la Saâne sur la commune de Quiberville le 26 décembre 1999 (tempête Lothar) ; (B) Inondation à l'exutoire de la Scie le 1er mars 2014 à la suite de précipitations (commune de Varengeville-sur-Mer).

Figure 1.34 : Zonage de l'aléa inondation dans la basse vallée de l'Arques, de la Scie et de la Saâne (données issues du PPRi de L'Arques, de La Scie et de La Saâne – DDTM 76, 2012, 2016)

Cet épisode est concomitant avec la tempête Lothar engendrant des submersions par paquet de mer et un blocage partiel des écoulements (Costa *et al.*, 2004). Le bilan de la conjonction entre inondations et tempête a été significatif. Un rapport estime à plusieurs dizaines de millions d'euros les coûts directs et indirects (assurances et reconstruction) de cet événement (Simon, 2000). Plus spécifiquement, les impacts de l'inondation dans la vallée de l'Arques s'élèvent à 76 particuliers sinistrés ainsi que plusieurs artisans et commerçants (chiffres non publiés). Les agriculteurs, des collectivités et les réseaux de transport et d'énergies ont également été impactés par la vague de crue (DDTM, 2016).

En raison de sa très forte urbanisation, diminuant la capacité d'infiltration des sols, les versants et la basse vallée de l'Arques sont particulièrement sensibles aux phénomènes de ruissellement (Joannon, 2004 ; DDTM, 2009). Parmi les nombreux événements recensés (27 événements), il est possible de décrire et d'illustrer avec les événements suivants :

- Le 7 mai 2000 est l'événement le plus important recensé à ce jour en termes de ruissellement (DDTM, 2009, 2016). L'origine de cet événement est liée aux 47 mm de précipitations tombés une heure, aggravés par l'imperméabilisation des sols faisant office de « rampe de lancement » de l'eau depuis les têtes de bassin jusque dans le fond de vallée, en forme de de cuvette, où se trouve Dieppe (photo A – Figure 1.35). En comparaison, 130 mm de précipitation sur une période 10 jours consécutifs ont inondé l'agglomération de Dieppe en janvier 1995 ;



(A) Le centre des impôts de Dieppe inondé à la suite de forte précipitation le 30 juillet 1994 ; (B) Rue d'Écosse inondée le 24 septembre 2012 ; (C) Le 27 juillet 2013 Dieppe est de nouveau inondé.

Figure 1.35 : Vallons propices aux crues turbides dans la basse vallée de l'Arques (données issues de la DDTM 76, 2009)

- Le 24 septembre 2012 un orage estival particulièrement fort a engendré 31,7 mm de précipitation en 24 h provoquant une concentration ruissellement sur des surfaces

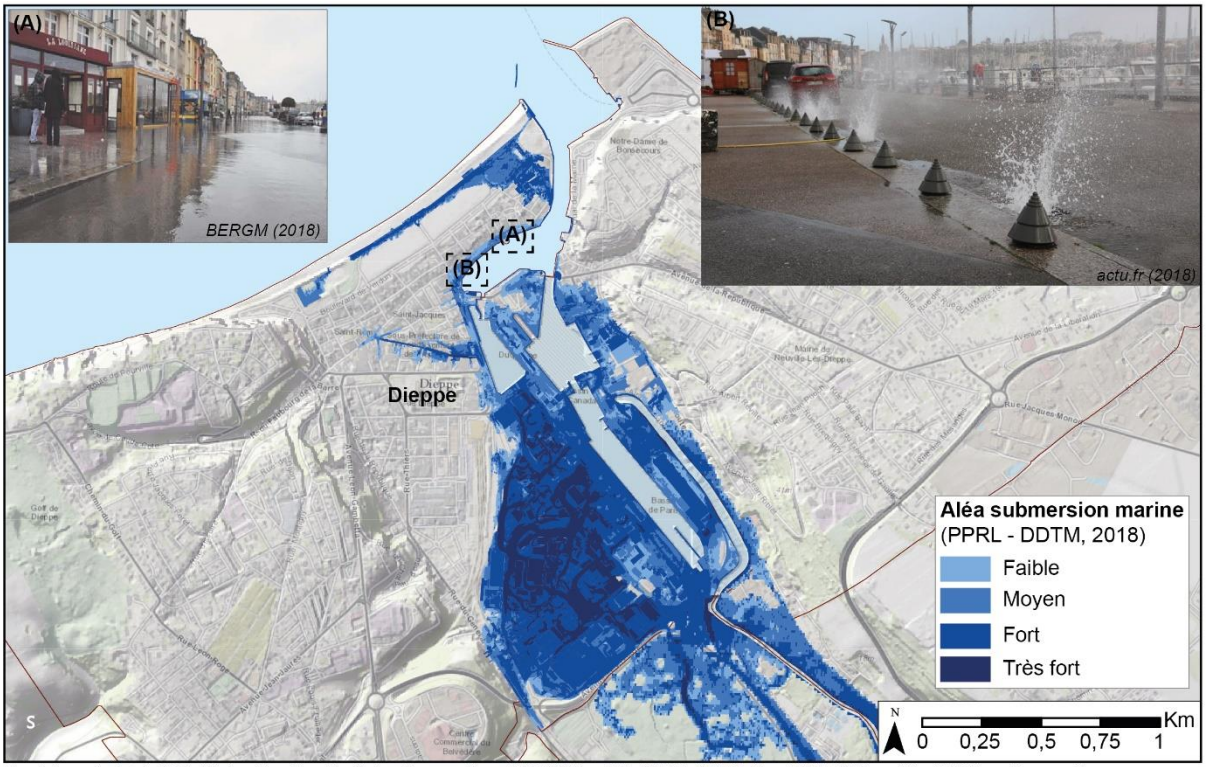
imperméabilisées par la sécheresse des mois précédents et provoquant localement 70 cm de lame d'eau (photo B – Figure 1.35) ;

- Le 27 juillet 2013, un violent orage s'abat sur la Seine-Maritime provoquant localement des mini-tornades ainsi que 27,7 mm de précipitations en moins de 48 h sur des surfaces imperméabilisées en raison d'un mois relativement sec (photo C – Figure 1.35).

L'épisode du 7 mai 2000 est concomitant avec une saturation du réseau d'eau pluviale et d'un coefficient de marée exceptionnel engendrant un blocage des écoulements à l'exutoire des bassins (DDTM, 2015). Le bilan de cet événement (dossier CatNat, 7 mai 2000) s'élève à : 27 habitations sinistrées ; plusieurs commerces et boutiques artisanales inondées dans la rue d'Écosse, des pertes agricoles principalement en tête de vallons, le centre des impôts inondé ainsi que quelques réseaux de transport. Des cas similaires de concentration du ruissellement ont été recensés sur les communes de rive gauche du bassin de la Scie (Gaume *et al.*, 2009 ; Douvinet *et al.*, 2015). Peu de données historiques existent sur le bassin du Dun et de la Saâne, mais des témoignages affirment que les populations locales ont été confrontées à des problèmes de crues turbides (Douvinet, 2008 ; Douvinet *et al.*, 2009 ; Douvinet et Delahaye, 2010).

c. *Les submersions marines dans les basses vallées du Pays de Caux*

En raison de sa forte anthropisation dans le fond de vallée à l'exutoire de L'Arques, l'agglomération dieppoise est la plus propice aux risques de submersions marines (Figure 1.36).



Fond de carte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN and the GIS User Community
Données : DDTM (BRGM, 2018)

(A) Exemple de submersion marine survenue sur le quai Henri IV (tempête Xynthia en février 1990) ; (B) Exemple d'une submersion marine dans la Rue du port à Dieppe (tempête Eleanor en janvier 2018).

Figure 1.36 : Zonage de l'aléa submersion à Dieppe sur le site n°2 (données issues de la DDTM 76, 2018)

Depuis 1950, 23 submersions ont ainsi été recensées dont quatre sont considérées comme sévères (Costa, 1997 ; Letortu, 2013 ; Letortu *et al.*, 2016). L'important cordon de galets (100 m de largeur) ainsi que les digues (brise vague) protègent partiellement la commune du déferlement des vagues et donc des submersions par paquet de mer. Cependant, les rues du port ainsi que la zone d'activité, avec la présence d'une caserne de pompiers à la sortie de la zone d'activité économique, sont sujettes aux débordements par surverse. Les montées des eaux (coefficient de marée >100) sont généralement concomitantes avec des problèmes de saturation du réseau de drainage (accentuant donc le ruissellement).

L'événement le plus marquant date des 27 et 28 février 1990 (tempête Vivian) et survient un mois après la tempête Daria (janvier 1990). Le coefficient de marée est de 108 et les hauteurs d'eau en Manche orientale atteignent 9,6 m ZH (Zéro Hydrographique) et des vagues de plus de trois mètres de hauteur (Caspar *et al.*, 2010). L'estimation des pertes matérielles et monétaires reste cependant difficile à évaluer localement pour de tels événements (DGPR, 2013). Un clapet de contrôle des débits de l'Arques a été installé dans le port de Dieppe. En cas de marée de vives-eaux, le clapet se ferme, bloque les écoulements provenant du bassin, et le port se remplit jusqu'à ce que la marée soit de nouveaux en mortes-eaux. Durant cette période de temps, L'Arques (comme pour La Bresle), reste temporairement sans exutoire et par conséquent le cours d'eau se remplit progressivement jusqu'à ce que le clapet soit de nouveau ouvert. Il convient de se poser la question aujourd'hui sur l'évolution des débordements de cours en cas de concomitance avec un haut niveau marin engendrant, de fait, un blocage des écoulements.

En résumé, le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) est affecté par des effondrements principalement localisés sur le plateau. En façade littorale, les aménagements localisés en bordure de plateau sont principalement sujets aux mouvements de terrain (éboulements et glissements de terrain) entraînant un recul des falaises (trait de côte). Sur les versants (anthropisés ou non) les précipitations vont tendre à se concentrer (dans les vallons secs et drainés) provoquant des phénomènes de crues turbides et de ruissellement concentré à l'exutoire des sous-bassins et dans la basse vallée. Ces basses vallées sont propices à des inondations provenant de débordement de cours (littoral et arrière littoral) ainsi qu'à des phénomènes de submersions par paquet de mer.

1.3.3. Site d'étude n°3 : Criel-sur-Mer à Ault

Le site d'étude n°3 s'étend de Criel-sur-Mer et Ault, sur la Côte d'Albâtre, sur un linéaire côtier de 12 km de falaises subverticales (cohérentes) entrecoupées de deux larges vallées occupées par L'Yères et La Bresle. Ce site d'étude intègre en grande partie la CC des Villes-Sœurs (16 communes), une partie de la CC des Falaises du Talou (quatre communes) et trois communes de la CC du Vimeu. Ces communes sont comprises dans un secteur d'influence maximale de la marée d'environ 10 km et dans des unités hydrologiques (L'Yères et La Bresle) homogènes de manière à avoir un territoire cohérent pour l'analyse des phénomènes naturels. De plus ce site a la particularité d'être à cheval à cheval entre le département de Seine-Maritime (76) et de La Somme (80), et comporte 23 communes. Les hautes falaises subverticales rendent les accès difficiles à la mer et, comme le site d'étude n°2, les aménagements se sont développés à l'exutoire des fonds de vallées (Criel-sur-Mer, Le Tréport, Eu, Mers-les-Bains) et en façade littorale sur le plateau.

La section 1.3.2.1 présente le contexte sociétal du site d'étude n°3 en termes de répartition de la population, d'occupation des sols et des différents types de réseaux. La section 1.3.2.2 s'intéresse plus spécifiquement aux phénomènes naturels pouvant survenir sur ce site d'étude en présentant les événements historiques majeurs.

1.3.3.1. Contexte sociétal du site d'étude n°3

a. Un développement économique et démographique autour de l'industrie et du commerce

Au regard du recensement de la population réalisé par l'INSEE en 2011 sur le site d'étude n°3, les communes les plus peuplées sont la commune d'Eu, avec plus de 7 000 habitants, ainsi que la commune du Tréport avec plus de 5 000 habitants (Figure 1.37). Ces deux communes sont situées à l'exutoire de la vallée de la Bresle. Les communes adjacentes et en façade littorale sont marquées par une population plus importante, entre 1 500 et 3 000 habitants, sur les communes de Mers-les-Bains (limitrophe à celles d'Eu et Le Tréport), Criel-sur-Mer et Ault. En arrière littoral, les communes les plus peuplées sont les communes d'Etalondes, de Saint-Pierre-en-Val, de Bouvaincourt-sur-Bresle, de Saint-Quentin-la-Motte-Croix-au-Bailly et de Béthencourt-sur-Mer comprenant entre 800 et 1 500 habitants. Le plus grand attrait des populations pour la façade est principalement lié à la présence des stations balnéaires à Criel-sur-Mer, Le Tréport et Mers-les-Bains et à une importante zone d'activités dans la vallée de La Bresle entre Le Tréport et Eu.

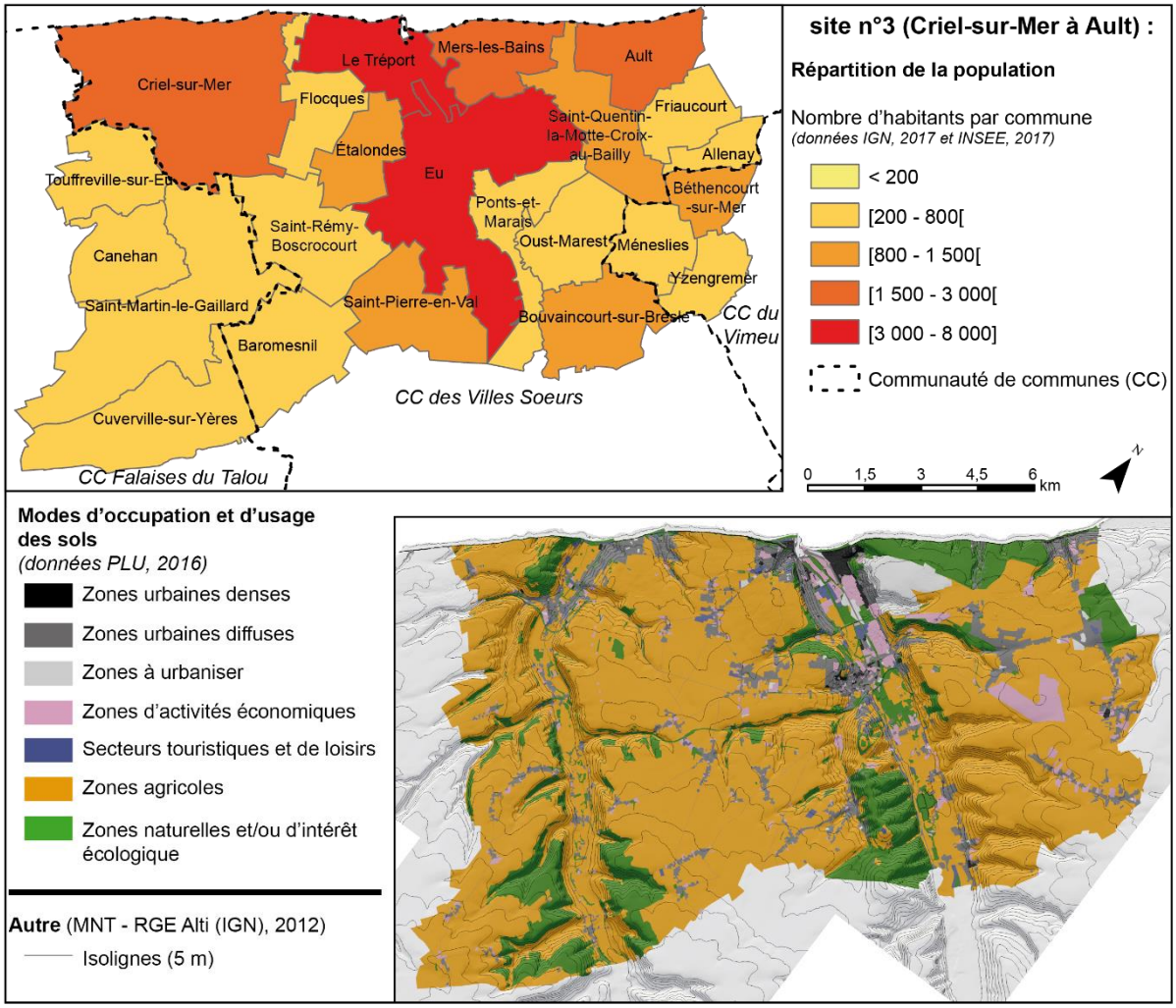


Figure 1.37 : Répartition des populations, occupation et usage des sols sur le site n°3

Comprenant une superficie totale de 17 000 hectares, le site n°3 (Criel-sur-Mer – Ault) est composé à 14 % de surfaces urbanisées, à 70 % de surfaces agricoles et 16 % de surfaces naturelles (Figure 1.37). Les zones d'habitats sont majoritairement pavillonnaires et diffuses

(90 %). L'ensemble du site se caractérise donc par la présence de villages ou hameaux au sein de vastes agricoles. Les zones urbaines les plus denses, en lien avec un effet de périurbanisation, sont localisées entre les trois communes adjacentes du Tréport, de Mers-les-Bains et d'Eu. Les trois quarts des activités économiques sont consacrés à l'industrie (50 %) et à l'agroalimentaire (25 %). La zone d'activité économique majeure du site est localisée dans la basse vallée de la Bresle et en zone basse (1,5 m sous un niveau marin centennal – DGPR, 2011). Les sites touristiques comprennent à 50 % des campings et à 30 % des zones d'activités sportives. La consommation de l'espace (12 000 hectares) est largement dominée par la culture du blé tendre (53 %) ainsi que par la prairie temporaire (20 %) et permanente (25 %) (RPG, 2016). Les zones naturelles sont relativement peu présentes (3 000 ha) et comprend des bois isolés (70 %) localisés le long de vallons secs et en façade littorale au nord-est du site. Ces zones naturelles correspondent également aux zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF de type I et II).

Ce site se caractérise donc par une forte anthropisation dans le fond de vallée et à l'exutoire du bassin de la Bresle et une population éparse sur le plateau, les versants des bassins et en arrière littoral de la vallée la Bresle et de l'Yères.

b. Une répartition hétérogène du réseau de transport et d'énergie

Des axes de communication majeurs permettent de relier facilement les communes d'Eu, du Tréport et de Mers-les-Bains (RD 925). Les routes communales permettent de relier les villages de taille moyenne et les stations balnéaires adjacentes (Criel-sur-Mer, Flocques, Ault, etc.) (Figure 1.38).

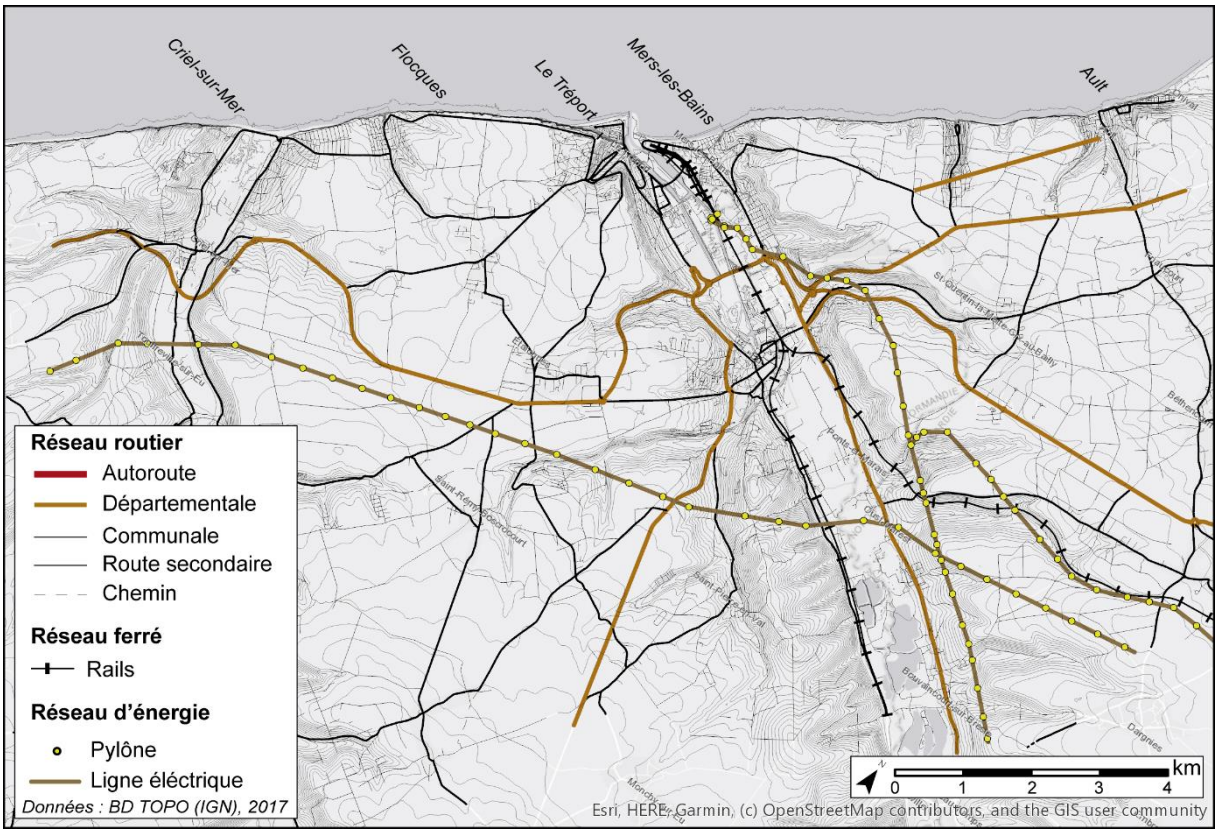


Figure 1.38 : Réseaux d'énergies et de transport sur le site d'étude n°3

Le réseau de routes secondaires permet d'assurer la connexion entre les zones urbaines isolées (hameaux, corps de ferme, etc.), mais est également plus facilement soumis à des interruptions. Ces interruptions peuvent alors significativement augmenter le temps de trajet de 15 à 30 minutes en moyenne en cas d'intervention des secours (Cerema, 2018). La gare du Tréport – Mers-les-Bains permet d'assurer la liaison entre la commune et les gares de Beauvais et Abbeville. En 2017, la fréquentation de ces deux lignes s'élevait à environ 50 000 voyageurs (soit 10 fois moins que la commune de Dieppe). Les communes et stations balnéaires voisines bénéficient seulement de dessertes de transport en bus pour les stations de Criel-sur-Mer et d'Ault. Le réseau d'énergie principal est situé dans la zone d'activité entre Mers-les-Bains et Eu dans la plaine alluviale de la Bresle. Le réseau suit les axes de circulation majeurs, c'est-à-dire la RD 925 (axe sud-est nord-est) et la RD 1015 (axe nord-ouest sud-ouest). Alimenté par la centrale nucléaire de Penly (à l'ouest de Criel-sur-Mer), le réseau électrique majeur (transformateur d'énergie, relais, etc.) reste peu développé sur ce secteur et sera assuré par les lignes secondaires (aériennes) pour alimenter en électricité les villages et hameaux en longeant les routes communales. Les zones urbaines isolées sont donc plus sujettes aux coupures généralisées d'électricité (notamment durant les événements tempétueux).

En résumé, la population du site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer – Le Tréport) est inégalement répartie et les principaux pôles de vies et d'activités sont localisés dans la commune du Tréport et d'Eu à l'exutoire de la vallée de La Bresle. Les modes d'occupation du sol sont majoritairement agricoles (70 %). Les principaux aménagements sont localisés à Criel-sur-Mer, Le Tréport, Mers-les-Bains et Eu. Une zone d'activités économiques majeures est localisée à Eu représentant un des pôles économiques de ce site d'études. Les communes du Tréport, de Mers-les-Bains et de Criel-sur-Mer bénéficient d'avantage d'attraits touristiques avec leurs stations balnéaires. En dehors du Tréport, les résidences sont pour l'essentiel des pavillons individuels. Les axes routiers permettent de rejoindre facilement les stations balnéaires, mais les communales plus rurales sont plus sensibles aux risques d'interruption des réseaux.

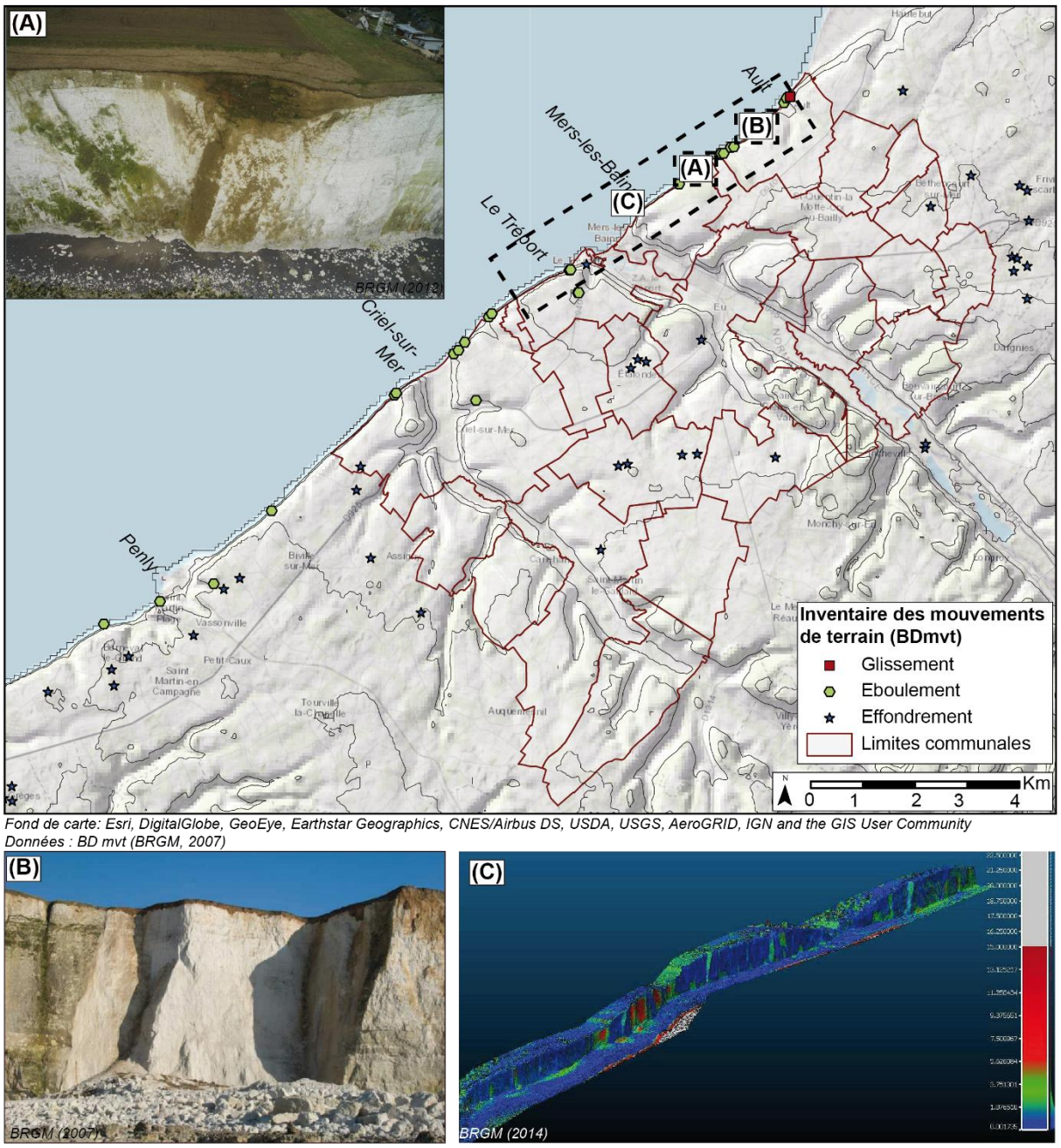
1.3.3.2. Phénomènes naturels affectant le site d'étude n°3

a. Les mouvements de terrain

Entre Criel-sur-Mer et Ault, les falaises crayeuses reculent, par éboulements et glissements d'ampleurs variables, à une vitesse moyenne comprise entre 10 et 70 cm par an. Ce recul progressif des falaises a eu pour conséquence de rapprocher les habitations pavillonnaires les plus proches du front de falaise, de 20 m à seulement 3 m de distance entre 1986 et 2013. Ces mouvements de terrain sont d'autant plus nombreux que le pied de falaise n'est pas protégé par un cordon de galets (nombreux sous-cavages) et qu'une fracturation assez importante fragilise le massif de la falaise (Figure 1.39 – A et B). En raison de la présence de nombreuses habitations en haut de falaises, parfois à quelques décimètres du front de falaise (BRGM, 1999), le site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer – Ault) fait l'objet de suivi par les services de l'État et par des laboratoires de recherche académiques (Figure 1.39 – C). En arrière littoral, le plateau est affecté par des effondrements de marnières. Les versants bordant les vallées ne semblent pas sujet aux glissements de terrain (à l'inverse du site d'étude n°1), mais cela reste à vérifier.

Un des événements les plus marquants a été localisé à l'est de Criel-sur-Mer à Mesnil-Val le 31 janvier 2013 (aux rues Chewington et Gontran de Malatrtic). Durant cet événement, la falaise, haute de 50 m, a été entaillée sur une largeur de 100 mètres avec un recul en haut de falaise compris entre 3 et 4 m. Les volumes de débris sur la plage ont été estimés entre 8 000 et 10 000 m³ traduisant le caractère brutal et instantané du recul des côtes au sein de ces environnements (pouvant allant jusqu'à 30 m pour les écroulements majeurs – Letortu, 2013).

À Ault, le dernier événement majeur est daté du 5 février 2017 à l'ouest de la commune (Route du Vieux Chêne Cise). Un effondrement de 20 000 m³ s'est produit faisant reculer la falaise de 4 m en une nuit. Cet effondrement est survenu à la suite de la tempête « Egon » (Pannet *et al.*, 2017). Une parcelle a été partiellement endommagée ainsi qu'une ancienne tour fortifiée et un hangar.



Fond de carte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN and the GIS User Community
Données : BD mvt (BRGM, 2007)

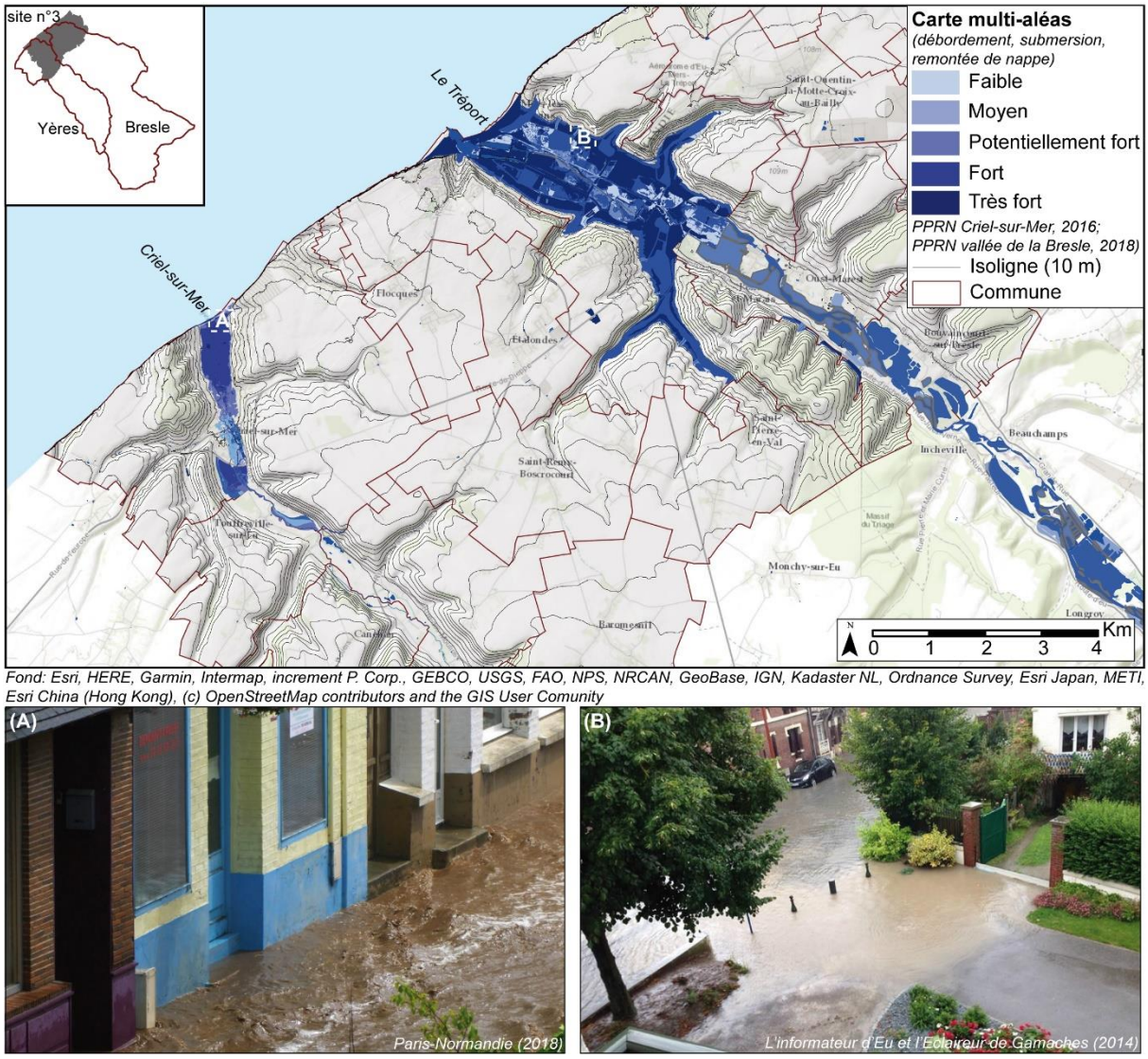
(A) Falaise subverticale à Ault ; (B) Cicatrice d'arrachement limitée par des fractures après un éboulement à l'ouest d'Ault, (C) Evolution du recul des falaises entre Le Tréport et Ault sur la période 2009 – 2013.

Figure 1.39 : Inventaire des mouvements de terrain sur le site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer – Ault) (BDmvt – BRGM, 2007)

En parallèle des problématiques liées aux glissements de terrain, le site d'étude n°3 est affecté par des ruissellements intenses (*flash flood*), des remontées de nappes et débordements de cours d'eau (lents) ainsi que des submersions marines.

b. Les inondations continentales et submersions marines

Les vallées de la Bresle et de l'Yères font l'objet d'une cartographie PPR tenant compte de l'impact des différents processus à travers une cartographie multi-aléas (DDTM, 2018). Trois aléas ont ainsi été combinés : (1) débordement de cours d'eau, (2) remontée de nappe et (3) l'aléa submersion marine. La méthode utilisée s'appuie sur deux règles : (1) si la zone comprend plusieurs aléas alors l'intensité la plus forte est retenue ; (2) si la zone comprend deux aléas de même intensité, une intensité supérieure est retenue (Figure 1.40).



(A) Inondation de Criel-sur-Mer par l'Yères le 31 mai 2018 (rue du 11 Novembre) ; (B) Inondation de l'avenue Pierre et Marie Curie par la Bresle le 28 juillet 2014.

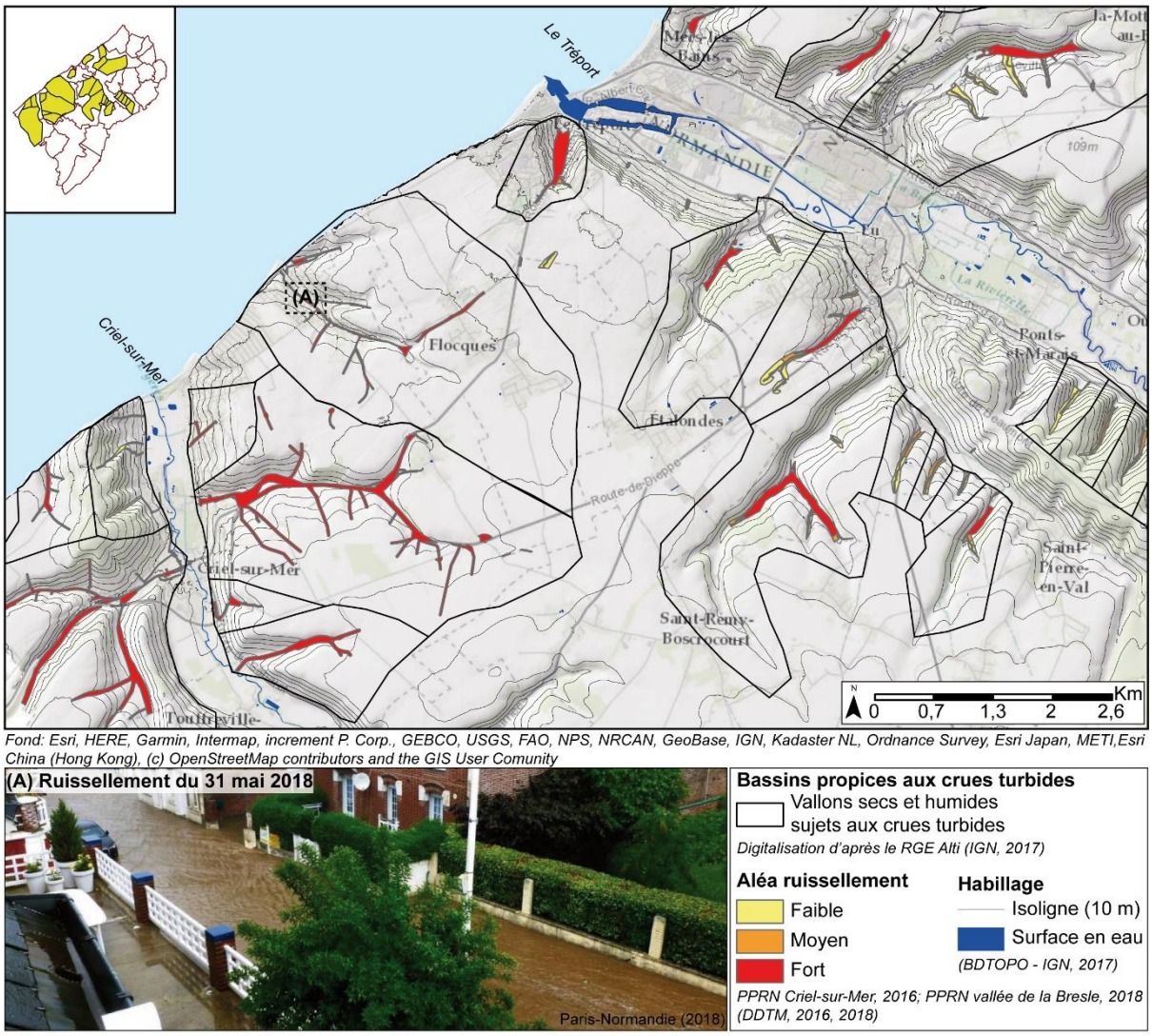
Figure 1.40 : Zonage de l'aléa inondation dans la basse vallée de L'Yères et de La Bresle (données issues du PPRI – DDTM 76, 2016, 2018)

Les crues du 8 mars 1995 et du 28 avril 2001, étalées sur plusieurs semaines, ont été retenues comme aléas de référence pour l'analyse des débordements de cours d'eau (Grojean, 2005 ;

GINGER, 2007 ; DDTM, 2018). Le 8 mars 1995, aucune mesure fiable n'a été mesurée sur la Bresle (station de mesure installée en 1999), tandis que l'Yères a atteint 10,2 $m^3.s^{-1}$ (contre 3,7 $m^3.s^{-1}$ en moyenne le même mois – *cf.* Figure 1.15). L'événement du 28 avril 2001 est une crue avec une période de retour centennale et est considéré comme l'évènement le plus important enregistré (CETE, 2011). La Bresle a atteint 17,7 $m^3.s^{-1}$ (contre 8,4 $m^3.s^{-1}$), tandis que l'Yères a atteint 10,5 $m^3.s^{-1}$ (contre 3,5 $m^3.s^{-1}$). Le bilan du 28 avril 2001 s'élève à un total 400 maisons inondées et 800 sinistrés sur 53 communes. Les gares et les axes routiers sont inondés et les pertes agricoles importantes (Lefrou, 2001 ; BRGM, 2001 ; archives de l'INA, 2017). Il reste cependant difficile d'obtenir plus précisément des informations, à l'échelle communale et locale, du montant des dégâts et des impacts ponctuels.

c. *Crues turbides et concentration du ruissellement*

Aucune date de référence n'a pu être retenue en raison de l'effet très localisé du ruissellement (DDTM, 2018). L'aléa a été spatialisé à partir d'une approche hydromorphologique, topographique et croisée avec un inventaire des événements historiques (Figure 1.41).



(A) Inondations engendrées par du ruissellement concentré le 31 mai 2018, Rue de la Mer à Mesnil Val.

Figure 1.41 : Vallons propices aux crues turbides dans la vallée de l'Yères et de la Bresle (données issues de la DDTM, 2018)

Deux secteurs ont été identifiés : (1) un réseau théorique d'écoulement défini à partir des axes de ruissellement et d'une enveloppe inondable de 5 m autour de ces axes (buffer) sur les versants et plateaux ; (2) une zone d'accumulation par analyse historique des événements et d'une enveloppe inondable de 10 m dans les fonds de vallée. Peu d'informations sont disponibles sur le bilan des dommages liés aux phénomènes de ruissellement, mais les différents témoignages (issues des archives nationales et départementales), ainsi que le nombre d'arrêtés CatNat (74 arrêtés prescrits sur le site n°3 entre 1984 et 2019) attestent de l'impact majeur de ces phénomènes.

En résumé, le site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer à Ault) est affecté par un important recul des falaises se traduisant sous la forme d'éboulements ou de glissements. Sur le plateau, en arrière littoral, le site est également marqué de nombreux effondrements de marnière. Les versants de ce site d'étude sont principalement affectés par des phénomènes de concentration du ruissellement (surface artificialisée) et par des crues turbides (surfaces en terre). Cette concentration du ruissellement et ces crues turbides vont alors directement impacter les aménagements localisés dans les fonds de vallées (sous-bassins) et dans les vallées de L'Yères et de La Bresle. Ces vallées subissent une interaction régulière entre différents phénomènes. D'une part les vallées de La Bresle et L'Yères subissent des débordements de cours d'eau et des remontées de nappes et d'autres part l'exutoire des vallées (Criel-sur-Mer, Le Tréport, Mers-les-Bains) subit des submersions marines fréquentes. Bien que cela ne soit pas quantifié, les rapports mentionnent une influence des hauts niveaux marins sur les débordements de cours d'eau dans ces vallées.

1.4. Conclusion du chapitre

En conclusion, les trois sites d'étude choisis pour cette thèse de doctorat présentent de nombreux enjeux socio-économiques (population et aménagements divers), mais selon une répartition spatiale très inégale selon les sites. Les pôles urbains principaux concentrent la plus importante population et les activités socio-économiques nécessaires au maintien ou au développement de ces pôles. Ces pôles se retrouvent à l'exutoire des principales vallées littorales : Deauville et Trouville-sur-Mer dans la vallée de La Touques sur le site d'étude n°1 ; Dieppe dans la vallée de L'Arques sur le site d'étude n°2 ; Criel-sur-Mer dans la vallée de L'Yères ainsi que Le Tréport, Eu et Mers-les-Bains dans la vallée de La Bresle sur le site d'étude n°3. Les aménagements sont principalement liés d'une part, aux activités touristiques et de loisirs (stations balnéaires, liaison transmanche, ports de plaisance, etc.) et d'autre part, à des activités industrielles, commerciales et de service. Ces zones d'activités socio-économiques sont très souvent localisées en zone basse (*i.e.* en dessous d'un niveau marin de référence) et près des cours d'eau.

En dehors de ces grandes agglomérations, les zones urbaines diffuses (petites villes, villages, hameaux, etc.) se répartissent sur les plateaux et dans les vallées, et accueillent des zones résidentielles (bâtiments collectifs et pavillons individuels). Les surfaces consacrées aux zones agricoles (cultures, prairies, élevage, etc.) et aux zones naturelles et/ou d'intérêt écologique sont également très variables d'un site à l'autre.

En raison du développement touristique depuis le XIXe siècle, les réseaux de transport se sont largement développés sur chacun des sites d'étude. Ces réseaux se traduisent par l'aménagement d'autoroutes, de routes nationales, de routes départementales ainsi que par des stations et réseaux ferroviaires reliant les pôles urbains principaux (stations balnéaires) à la capitale et aux autres pôles régionaux et départementaux. Par ailleurs, le réseau transport

secondaire est moins bien développé peut engendrer des problèmes d'accès pour les secours et les populations dans le cas où la route est coupée par un glissement de terrain ou bien submergée lors d'une inondation. Le réseau électrique est à l'image du réseau de transport. Les systèmes d'alimentation sont localisés près des communes les plus densément peuplées et un réseau électrique secondaire alimente les villages et hameaux sur le reste des sites.

Ces principaux aménagements, très souvent localisés à l'exutoire des vallées littorales et en façade littorale, peuvent être confrontés à des inondations continentales, à des submersions marines et à des mouvements de terrain (glissements de terrain, éboulements, écroulements, chutes de blocs, etc.). Des effondrements de marnières peuvent également se produire sur les plateaux en arrière littoral.

À titre d'illustration, une synthèse du zonage des aléas a été réalisée sur les différents sites d'étude grâce aux informations disponibles contenues dans les rapports des documents d'urbanisme et des cartographies réglementaires PPR (Figure 1.42). Bien que les phénomènes présents sur chacun des sites soient assez bien connus des scientifiques et des services de l'État, il n'y a pour l'heure que des informations descriptives sur les interactions et les effets de concomitances pouvant survenir entre ces différents phénomènes. Ces interactions peuvent être amenées à évoluer dans un contexte de changement climatique prévoyant + 1 m du niveau marin en Manche à l'horizon 2100.

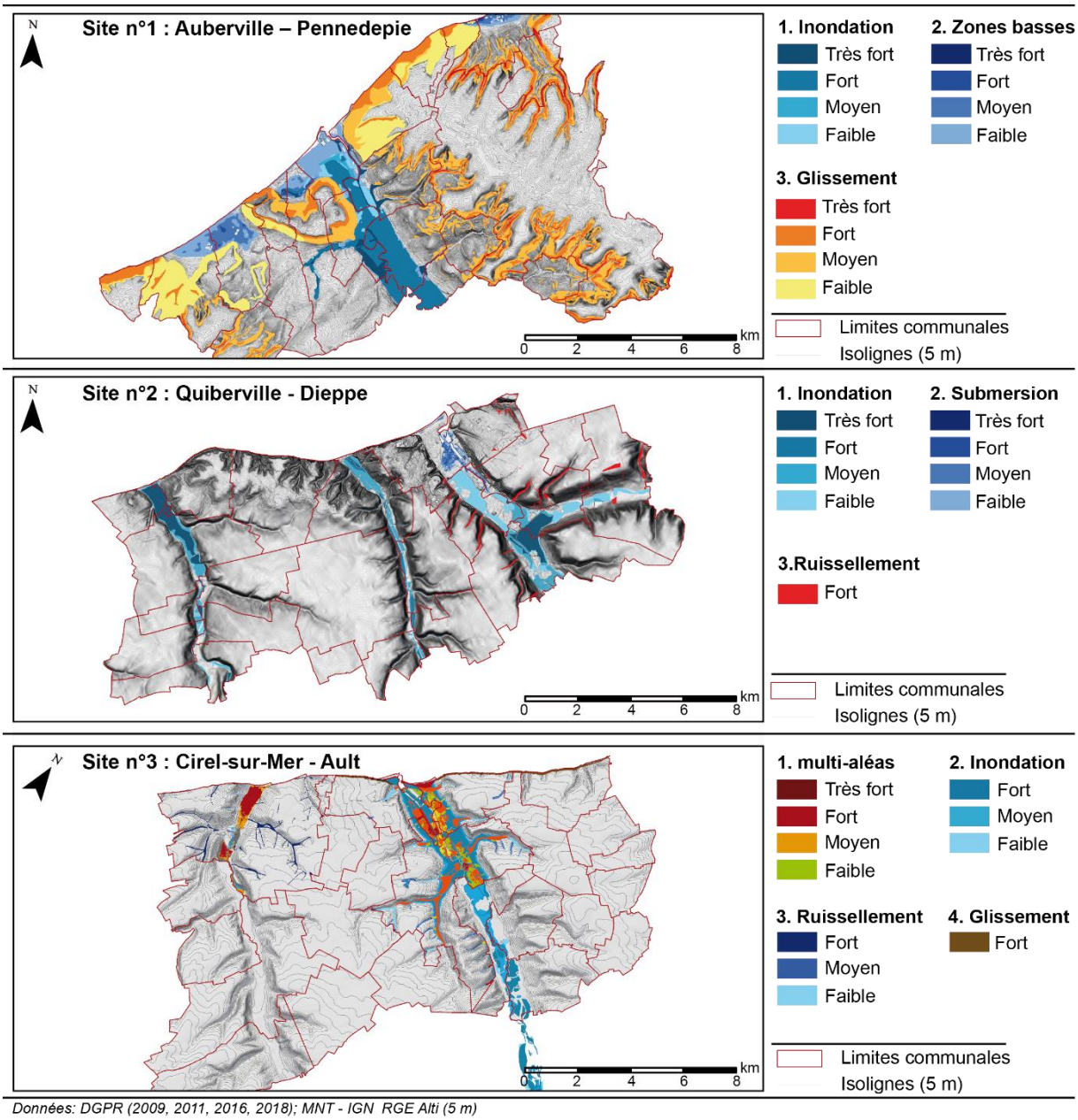
Cette élévation avérée du niveau marin se produit dans un contexte de forte interaction entre la mer et les vallées littorales en Normandie. Des exemples de concomitance se sont déjà produits par le passé sur chacun des trois sites d'études retenus tel que la tempête Eleanor les 3 et 4 janvier 2018 où des submersions marines sont survenues de façon simultanée à des débordements de cours d'eau sur le site n°1 (Auberville – Pennedepie). Sur les sites n°2 (Quiberville – Dieppe) et n°3 (Criel-sur-Mer – Ault), l'événement concomitant le plus marquant est celui du 26 décembre 1999 et 28 décembre 1999 où les plus hauts débordements de cours d'eau enregistrés à ce jour se sont produits simultanément à des submersions marines durant la tempête Lothar et Martin.

Si depuis ces dernières années des mesures de prévention ont été mises en place à travers des plans programmes (PAPI – Programmes d'Action et de Prévention des Risques), il convient à présent de s'interroger sur l'évolution des phénomènes naturels dans un contexte de changement climatique. Selon les scénarios émis par le GIEC – IPCC (2013), les précipitations vont diminuer en moyenne de -12 % à l'horizon 2100, mais seront plus concentrées sur des périodes plus courtes. L'augmentation de fréquence d'épisodes pluvieux concentrés sur des périodes courtes nous amène à nous interroger dès aujourd'hui sur l'impact des crues turbides à moyen et long terme.

Actuellement, les infrastructures de protection sont mises en place et calibrées pour un type de phénomène et selon une intensité donnée. Dans le cas où ces mêmes phénomènes naturels vont être amenés à évoluer, et à potentiellement entrer de plus en plus en interaction entre eux (e.g. submersion marine et débordement, ruissellement et mouvement de terrain, etc.), il devient nécessaire de s'interroger sur la validité actuelle des infrastructures de protection (sous-calibration) et sur la détermination de secteurs potentiels de relocalisation des biens et des personnes.

Ainsi, chacun de ces trois sites présente d'importants enjeux socio-économiques liés aux densités de population, pouvant doubler durant la période estivale (e.g. Deauville, Dieppe, Le Tréport, Mers-les-Bains, etc.), aux activités économiques, marquées par la présence d'importantes zones d'activités dans les basses vallées littorales et aux activités touristiques

dans les stations balnéaires. Les différentes recherches et études mettent à disposition de nombreuses et diverses bases de données, parfois à compléter, pour chacun de ces sites d'étude. L'utilisation de ces multiples bases de données va nous permettre de mieux caractériser les éléments exposés, de quantifier leurs conséquences potentielles pour chacun des territoires d'étude puis de quantifier les potentiels effets de concomitance dans les basses vallées littorales.



Site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) : synthèse (1) du projet de zonage de l'aléa mouvement de terrain (PPRmvt – DDTM 14, 2016), (2) de la prédisposition aux glissements de terrain (DREAL, 2004), (3) du projet de zonage de l'aléa inondation (PPRi – DDTM 14, 2016) et (4) des zones basses (DGPR, 2011) ; site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) : synthèse (1) du zonage de l'aléa inondation (PPRi – de L'Arques, de La Scie et de La Saâne, DDTM 76, 2012 et 2016), (2) zonage de l'aléa ruissellement (PPRN – DDTM 76, 2009) et (3) zonage de l'aléa submersion marine (PPRL – DDTM 76, 2018) ; site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer – Le Tréport) : zonage multi-aléas issu (PPR multi-aléas – DDTM 76, 2016 et 2018).

Figure 1.42 : Synthèse de l'emprise des différents phénomènes connus sur les sites d'étude issue des zonages des aléas menés dans le cadre de la cartographie réglementaire PPR

Chapitre 2. Caractérisation des éléments exposés à différentes échelles spatiales

Les éléments exposés (EE) sont des entités pouvant être impactées par un phénomène naturel (glissement de terrain, éboulement, inondation, etc.). Plusieurs méthodes permettent de caractériser ces éléments à travers des approches expertes ou d'ingénierie. Au sein de ces approches, la méthode orientée « indice » est la plus flexible et permet l'intégration d'un large éventail d'informations pour caractériser les éléments exposés d'un territoire. Traditionnellement, les critères utilisés pour décrire les éléments exposés sont déterminés à une seule échelle spatiale (puis sont zoomés ou dézoomés). Une approche permettant d'adapter la précision des EE en fonction de l'échelle considérée a été développée dans ce chapitre à travers l'utilisation de bases de données multiples (provenant de plusieurs sources). Des modèles d'intégration et d'harmonisation de ces bases de données ont ainsi été développés dans le cadre de cette thèse sur des plateformes de SIG.

2.1. Introduction du chapitre

L'analyse et la gestion du risque impliquent différents acteurs, provenant de différents secteurs, autour d'une tâche commune : réduire l'impact des phénomènes « naturels » sur les sociétés (Gerkensmeier et Ratter, 2018). Par conséquent, les échelles spatiales considérées, pour mener les différentes analyses, varient selon le secteur d'affiliation ainsi que selon les objectifs attribués par ces différents acteurs. Cependant, il existe encore peu de recherches sur la question du choix des échelles dans les analyses de risque ainsi que de leurs justifications (Adger *et al.*, 2009 ; Siembieda, 2010). L'absence de cohérence et de connexion entre les échelles spatiales peut alors entraîner des problèmes de coordination entre les différents acteurs (Rodriguez-Acosta et Rosenbaum, 2005). Encore peu abordées, ces questions sur les échelles spatiales considérées ainsi que leurs justifications impliquent de s'intéresser à la précision spatiale et au niveau de détail des données géographiques nécessaires à chacune des échelles d'analyse (Biljecki *et al.*, 2018). La précision spatiale des éléments exposés a pourtant un impact fondamental sur l'analyse même des risques et peut induire de fortes incertitudes selon l'échelle d'analyse spatiale considérée (Brovelli *et al.*, 2016).

Ce chapitre vise à caractériser les éléments exposés à différentes échelles spatiales et il est structuré autour de **trois sections principales**, à la suite de la section 2.1 consacrée à l'introduction du chapitre, et avant la section 2.5 de conclusion du chapitre.

La **section 2.2** s'intéresse aux choix des critères et des résolutions à adapter aux choix des différentes échelles spatiales retenues pour mener les analyses. Ces échelles d'analyses sont similaires à celles utilisées dans le cadre d'une analyse des aléas (van Westen, 2000 ; van Westen *et al.*, 2008). Les critères utilisés, ainsi que la résolution spatiale des EE, sont déterminés à partir d'une synthèse bibliographique et à partir de méthodes orientées « indice » appliquées dans différents contextes d'analyses des risques.

La **section 2.3** présente les différents modèles d'intégration et d'harmonisation permettant de caractériser les EE. Fondé sur des modèles types ETL (*Extraction Transformation Loading*) et appliqué dans un environnement SIG, l'ensemble du processus nécessite la réalisation d'un inventaire des bases de données disponibles ainsi que la détermination de la précision de l'information. Au sein même des modèles d'intégration ainsi développés, certaines bases de données provenant de différentes sources sont combinées afin d'obtenir une nouvelle information. Des essais de développement d'outils SIG, réalisés par *Visual Scripting*, permettent d'automatiser partiellement le processus de modélisation.

La **section 2.4** présente les résultats des modèles d'intégration et d'harmonisation des bases de données à différentes échelles d'analyse spatiale ainsi que les marges d'erreur des modèles. Les modes de représentation cartographique (2D ou 3D) ainsi que les clés de transposition des modèles, dépendant des bases de données disponibles, à des sites adjacents sont également présentés et discutés.

Une grande partie de ce chapitre reprend les développements de l'article « *Characterization of elements at risks in the multirisk coastal context and at different spatial scales : Multi-database integration (Normandy, France)* » de Kévin Graff, Candide Lissak, Yannick Thiery, Olivier Maquaire, Stéphane Costa, Mohand Medjkane et Benoit Laignel, publié par la revue « *Applied Geography* », le 2 septembre 2019 (Graff *et al.*, 2019b). Cet article sera trouvé en annexe n°1.

2.2. Critères et résolution adaptés aux choix des échelles spatiales

Afin de réaliser des liens entre différentes échelles spatiales et de proposer une représentation, à une précision spatiale cohérente, des données géographiques à chacune de ces échelles, cette section aborde successivement : les échelles spatiales considérées dans les analyses de risque et les modes de représentation des éléments exposés (section 2.2.1) ; la détermination des critères utilisés pour décrire les éléments exposés pour différents types de risque dans une gamme d'échelles spatiales spécifiques à partir d'une revue de la littérature (section 2.2.2) ; le choix des éléments exposés et l'attribution des différents critères aux différentes échelles spatiales considérées (section 2.2.3).

2.2.1. Les échelles spatiales d'analyse et leurs modes de représentation

La question des échelles spatiales et de leurs terminologies peut engendrer des divergences et des débats au sein même de la communauté scientifique. **Trois critères** doivent être respectés pour qu'un changement d'échelle puisse être considéré comme effectif (Masson, 2009) et doivent comprendre :

(1) Un changement de niveau juridique ou administratif (unité départementale, communale, parcellaire, etc.) ;

(2) Un changement de métrique spatiale (e.g. passage d'une échelle au 1 : 100 000 au 1 : 25 000) ;

(3) Un mode de représentation spatiale (lié au degré de généralisation ou de complexification des items à représenter).

En géographie, ces trois éléments sont fondamentaux dans l'interconnexion des échelles spatiales et l'analyse des éléments exposés. Ces changements d'échelle (administratif, métrique et représentatif) vont avoir un impact direct sur l'interprétation même de l'analyse des risques (et des éléments exposés). Il convient donc d'identifier clairement les différentes échelles spatiales utilisées au regard de la littérature ainsi que des modes de représentation classiquement employés.

2.2.1.1. Les échelles spatiales considérées dans les analyses de risque

Les différents ouvrages scientifiques et documents juridiques montrent que différentes échelles d'analyses sont considérées dans l'analyse et la gestion des risques. La terminologie utilisée peut différer selon les auteurs, mais correspondent schématiquement à **six échelles spatiales d'analyse** : (1) l'échelle mondiale, (2) l'échelle nationale, (3) l'échelle régionale, (4) l'échelle moyenne (ou échelle intercommunale), (5) l'échelle large (ou échelle communale) et (6) l'échelle locale (Figure 2.1). Les échelles d'analyse sont à associer à une gamme de valeur numérique (e.g. l'échelle locale est comprise entre le 1 : 10 000 et le 1 : 2 000), une taille de pixel correspondant à la taille minimum requise pouvant être lisible par une plateforme SIG à l'échelle indiquée et à une taille de contour de ligne (dans un format vectoriel) minimum pouvant représenter un espace donné (van Westen, 2000 ; van Westen *et al.*, 2008 ; Ernst *et al.*, 2010 ; Webb *et al.*, 2016).

	Echelle indicative	Type d'application
	Echelle mondiale > 1 : 1 000 000 Taille du pixel : >1 000 m Contour : > 300 m	Analyse globale des risques: - exposition des populations aux aléas ; - tendance d'évolution des risques avec les changements globaux ; - estimation globale des pertes (au km²) ; - etc. Auteurs : Dilley *et al.* (2005) ; Birkmann et Welle (2015) ; Zhang *et al.* (2017)
	Echelle nationale 1 : 1 000 000 à 1 : 250 000 Taille du pixel : >500 m Contour : 180-80 m	Stratégie nationale de gestion des risques: - cartographie à l'échelle nationale des risques ; - détermination de réseaux d'observation ; - développement de stratégies (de gestion) communes ; - budgétisation / financement. Auteurs : Alnedawy *et al.* (2015) ; Mousazadeh *et al.* (2017)
	Echelle régionale 1 : 250 000 à 1 : 100 000 Taille du pixel : 500-200 m Contour : 80-40 m	Plan de gestion des risques : - détermination des grands objectifs ; - organisation des stratégies de gestion ; - planification à des territoires à moyen et long terme. Auteurs : Carpignano *et al.* (2009) ; Gerkensmeier et Ratter (2018)
	Echelle moyenne 1 : 100 000 à 1 : 25 000 Taille du pixel : 200-100 m Contour : 20 m	Evaluation des risques et des éléments exposés : - étude de faisabilité ; - analyse des risques ; - étude de conséquences potentielles. Auteurs : Kappes *et al.* (2011) ; Cascini *et al.* (2013) ; van Westen *et al.* (2014)
	Echelle large 1 : 25 000 à 1 : 10 000 Taille du pixel : 100-10 m Contour : 5 m	Prévention des risques (*e.g.* PPR) : - Caractérisation des infrastructures critiques ; - étude de conséquences potentielles. Auteurs : Johnson *et al.* (2016) ; Birkmann et Welle (2015) ; Zhang *et al.* (2017)
	Echelle locale 1 : 10 000 à 1 : 2 000 Taille du pixel : <10 m Contour : 2,5 m	Gestion des risques : - mise en place d'action local (PAPI, etc.) ; - mise en place de plans communaux de sauvegarde ; - évaluation des coûts-bénéfices (absolue) des aménagements ; - étude des conséquences potentielles. Auteurs : Abbas et Routray (2013) ; Godfrey *et al.* (2015) ; Sanchez *et al.*, 2018)

Fond: ©OpenStreetMap & contributors

Figure 2.1 : Échelles spatiales considérées dans les analyses de risque et exemples d'application

La démarche d'évaluation des risques doit idéalement se réaliser grâce à un système d'emboîtement (ou d'imbrication) des échelles d'analyse (Charlier et Decrop, 1997 ; Aleotti and Chowdhury, 1999 ; Bell et Glade, 2004). Deux approches ont été développées autour du système de développement des échelles :

- **L'approche par « *upscaling* »** qui consiste à définir localement des éléments (exposés, processus, facteurs d'instabilité, etc.) et de modéliser l'ensemble des relations et interactions possibles localement (Maquaire, 2002 ; Bell et Glade, 2004 ; Thiery, 2007). Ces informations sont ensuite synthétisées et simplifiées à une échelle moyenne ou large (Figure 2.2). Cette approche est particulièrement efficace lorsque les problèmes sont identifiés localement et nécessite ensuite une analyse plus globale afin d'être comprise dans leur ensemble ;

- **L'approche par « *downscaling* »** est la démarche inverse. En partant d'information générale à échelle régionale ou moyenne, les données sont peu à peu complexifiées à une échelle large puis locale (Bock *et al.*, 2005 ; Winsemius *et al.*, 2013 ; Zhang *et al.*, 2018). Cette approche est utile dans le cas où une information est connue globalement, mais nécessite une meilleure compréhension localement (e.g. impact d'une inondation sur un commerce ou bâtiment) (Figure 2.2).

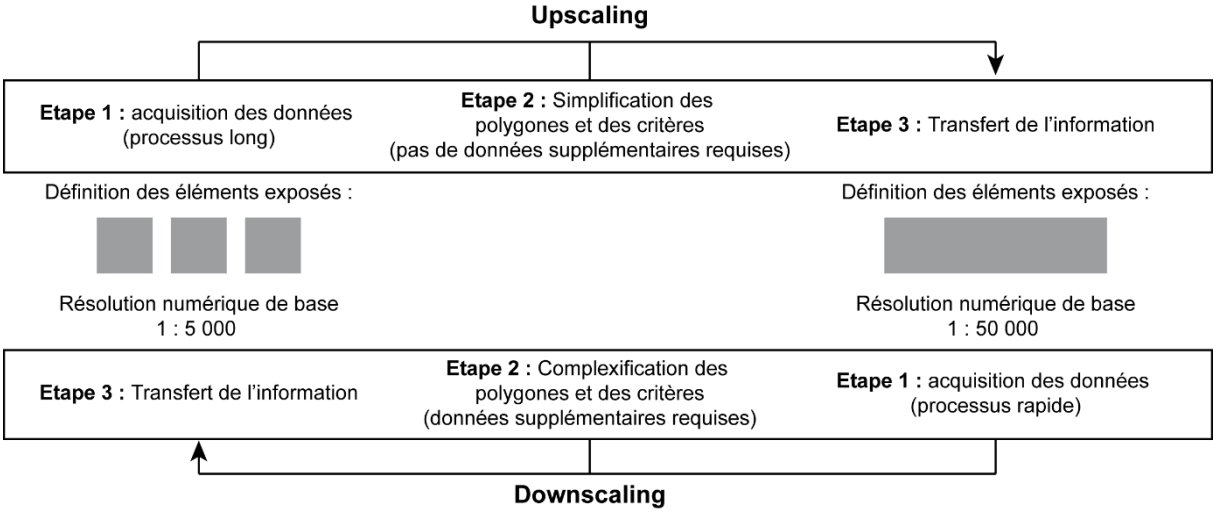


Figure 2.2 : Les approches utilisées dans un système par imbrication des échelles spatiales

La transposition des données à différentes échelles spatiales reste rare et comprend généralement un unique changement de la métrique spatiale sans considérer l'adaptation du mode de représentation. Dans le cas d'une approche par *upscaling*, le processus de simplification et l'extrapolation des données, nécessaire au changement d'échelle, peuvent engendrer des incertitudes significatives (Corominas *et al.*, 2003 ; van Westen *et al.*, 2006). Par exemple, un groupe d'habitations, certaines considérées en résidence principale et d'autres en résidence secondaire, est aggloméré en un seul espace bâti. À l'inverse, une approche par *downscaling* nécessite des données complémentaires pouvant être plus ou moins longues à acquérir. Ces données nécessitent par la suite des traitements complémentaires afin d'établir un lien avec la base d'information initiale (Birkmann, 2007 ; Bock *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2018).

Certaines études proposent une analyse à plusieurs échelles spatiales (Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018). Les résultats obtenus à différentes échelles peuvent apparaître cependant trop souvent déconnectés les uns des autres et ces résultats sont transposés de façon analogique sur la base d'un jugement expert (Thiery, 2007). Un développement méthodologique est nécessaire pour transposer, représenter et vérifier les transferts d'information aux différentes échelles d'analyse ce qui est progressivement réalisé au sein des organismes (e.g. IGN, ©OSM, etc.).

2.2.1.2. Mode de représentation des éléments exposés

Le mode de représentation des éléments exposés est au cœur des questions du transfert des échelles spatiales (par *upscaling* ou *downscaling*). Les unités d'observation (ou unités spatiales d'observation) régulières ou irrégulières sont les deux modes de représentation possibles des éléments exposés sur un territoire donné. Une unité est dite régulière lorsqu'un espace partitionné par un maillage (cellules) régulier, indépendamment de la structuration physique

« réelle », couvre l'ensemble du territoire d'étude (Pumain et Saint Julien, 2010 ; Li *et al.*, 2016 ; Juigner 2017 ; Satta *et al.*, 2017). L'organisation de ce maillage est soit :

- **Homogène et continue**. La forme la plus couramment utilisée étant des carreaux (pixels – définis par une longitude X et une latitude Y). Les tailles de maille varient selon l'échelle d'analyse : Li *et al.* (2016) intègrent l'exposition des bâtiments et des terres cultivées aux risques d'inondation sur des cellules de 200 × 200 m à l'échelle d'une ville ; Abuodha et Woodroffe (2010) utilisent des cellules de 1,5 × 1,5 km de résolution pour évaluer la vulnérabilité des côtes sud-est australiennes. Différentes formes se développent comme les hexagones (rendant la modélisation plus cohérente), les rectangles développés principalement sur le linéaire côtier (Juigner, 2017), etc. ;
- **Aléatoire et discontinue**. Les diagrammes de Voronoï et polygones de Thiessen sont les plus couramment utilisés et servent essentiellement à la modélisation de phénomènes physiques liés aux inondations et précipitations à partir d'un ensemble discret de points (Mensah *et al.*, 2017 ; Mistry *et al.*, 2017 ; Evin *et al.*, 2019).

Les unités spatiales d'observation irrégulières sont des représentations géométriques plus ou moins simplifiées d'un objet possédant des limites finies (zonales) au sein d'une dimension physique (Caloz et Collet, 2011). **Deux types de limites** peuvent alors être considérées :

- **Des limites administratives et/ou juridiques** correspondant à des limites virtuellement (et dans certains cas physiquement) définies et collectivement admises (e.g. limites communales, départementales, zone urbaine, zone habitat collectif, zone à urbaniser, etc.). Par exemple, à l'échelle nationale, voire globale, les unités administratives (communales) sont couramment utilisées dans le cadre d'analyse multirisque (Dilley *et al.*, 2005 ; Jia *et al.* 2017) ;
- **Des limites « physiques »** épousant les formes d'un objet pouvant se décliner sous différentes formes (e.g. bâti, champs, forêts, prairie, cellule hydrosédimentaire, etc.). Ce mode de représentation nécessite une certaine précision et qualité des données géographiques, fournies par des organismes spécialisés ou nécessitant des campagnes de terrain. Ces représentations sont classiquement utilisées pour évaluer avec précision un élément exposé et/ou son environnement (Rodriguez-Acosta et Rosenbaum, 2005 ; Kappes *et al.*, 2012a, 2012b ; Abbas and Routray, 2013 ; Sanchez *et al.*, 2018).

Dans le cas d'un mode de représentation utilisant des unités spatiales d'observation irrégulières, la précision spatiale des éléments exposés doit être cohérente avec l'échelle d'analyse considérée (Figure 2.3). Au regard des ouvrages et articles scientifiques, les unités administratives (département, communes, etc.) sont préférées à une échelle globale ou nationale (Dilley *et al.*, 2005 ; Birkmann et Welle, 2015 ; Jia *et al.* 2016). À l'échelle régionale, les unités juridiques (e.g. centre urbain, zone résidentielle) et modes d'occupation des sols sont plus couramment utilisés et permettent d'apporter une information très simplifiée sur les éléments exposés sur de grands espaces (Carpignano *et al.*, 2009 ; Promper *et al.*, 2015 ; Ženka *et al.*, 2016). À l'échelle moyenne, les limites juridiques précises sont utilisées en complément de limites physiques s'étendant sur de vastes surfaces (e.g. surfaces agricoles, zones forestières, etc.) (Kappes *et al.*, 2011 ; Cascini *et al.*, 2013 ; van Westen *et al.*, 2014). À l'échelle large et locale, les limites physiques sont essentiellement utilisées et considèrent, dans la plupart des cas, des aménagements et des infrastructures (e.g. bâtiments, réseaux de transport ou d'énergie, etc.) (Abbas et Routray, 2013 ; Karagiorgos *et al.*, 2016 ; Sanchez *et al.*, 2018).

Chaque scène contient les mêmes éléments exposés avec des modes de représentation différents. (A) Précision et représentation des données communément utilisées à l'échelle nationale ; (B) Mode d'occupation des sols avec une forte généralisation de la précision à l'échelle régionale ; (C) Mode d'occupation non simplifié à échelle moyenne ; (D) Représentation des infrastructures avec un niveau de détail moyen à précis ; (E) Représentation des infrastructures avec un niveau de détail précis à très précis.

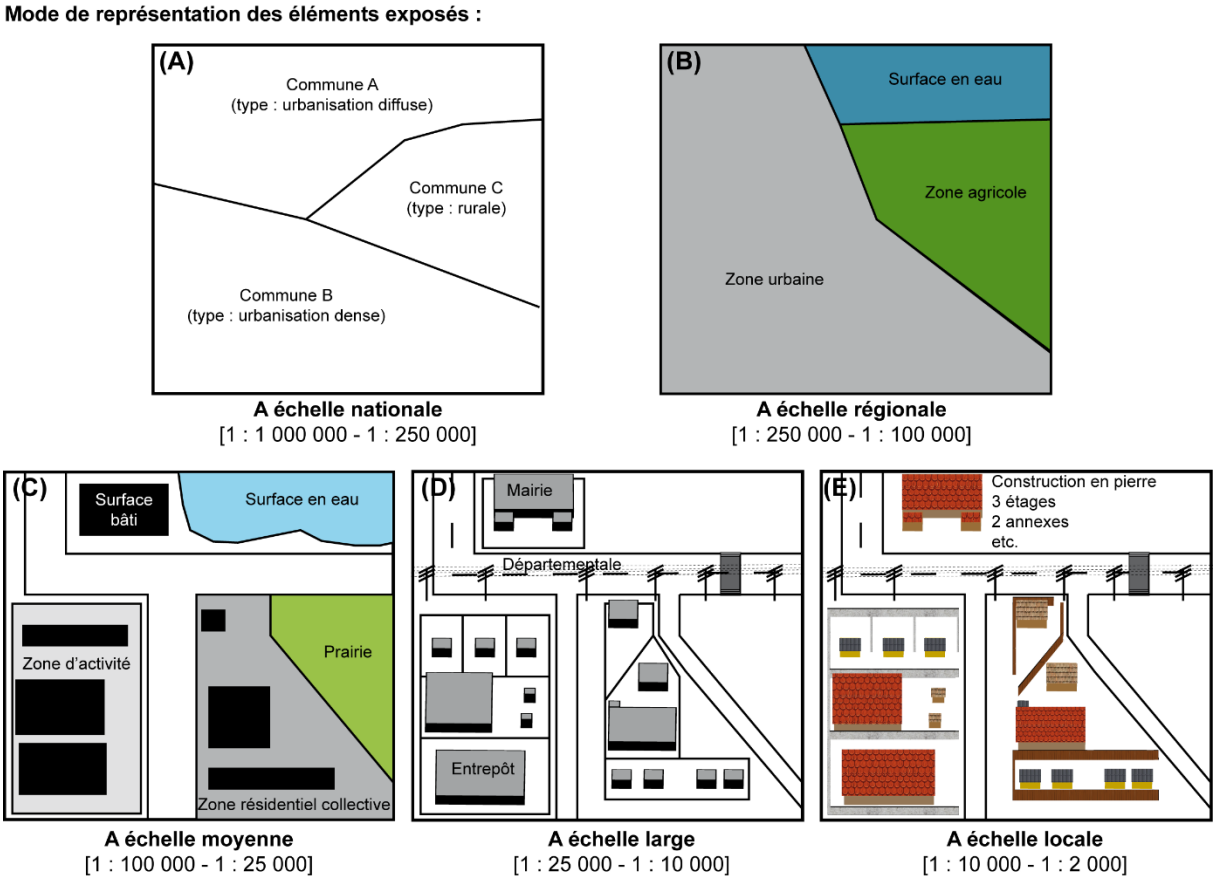


Figure 2.3 : Unité spatiale d'observation et mode de représentation irrégulière communément utilisés dans les analyses de risque à différentes échelles d'analyse spatiale

Pour des questions d'économie d'espace mémoire et de réduction du temps de traitement des calculs, les modes de représentation réguliers (pixel) sont largement utilisés. L'amélioration des systèmes d'information géographique ainsi que des technologies associées (mémoire vive, espace de stockage, etc.) permettent l'utilisation progressive des limites physiques dans les modes de représentation (Zhang *et al.*, 2009 ; Rafiee *et al.*, 2014 ; Kang et Hong, 2015). Alors que la représentation se contente en général d'une représentation en deux dimensions (longitude X, latitude Y), la dimension verticale (3D) prend de plus en plus d'importance dans les représentations des éléments exposés (Geiger *et al.*, 2015).

2.2.2. Détermination des éléments exposés et des critères utilisés selon différentes méthodes d'analyse des risques

Les éléments exposés se caractérisent à la fois par un mode de représentation spatiale traduisant sa géométrie au sein d'un espace, mais également par des critères (e.g. type, fonction, âge, distance à une rivière, etc.). Ces critères servent à décrire les caractéristiques intrinsèques des éléments exposés (UN/ISDR, 2004 ; Cardona, 2004 ; Thywissen, 2006 ; Birkmann, 2007). Les critères utilisés permettent alors de traduire les éléments exposés sous la

forme de conséquences potentielles (*cf.* chapitre 3) (Puissant *et al.*, 2013 ; Scheuer *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) ou traduisent un degré de vulnérabilité par rapport à un aléa donné (Kappes *et al.*, 2012a ; van Westen *et al.*, 2014 ; Ciurean *et al.*, 2017).

Au regard des nombreux ouvrages et articles scientifiques portant sur les analyses du risque et des conséquences potentielles, il n'existe à l'heure actuelle aucun consensus sur les éléments exposés devant être intégrés et sur les types de critères à utiliser aux différentes échelles d'analyses spatiales et pour différents types de risque. Cette absence d'harmonisation pose la question de la comparaison des résultats pour différentes méthodes, différents territoires d'étude et différents types de risques (inondation, glissement, etc.) considérés. Une synthèse bibliographique des différentes méthodes d'analyse ainsi que des éléments exposés et critères utilisés est indispensable pour proposer des échelles et des résolutions (spatiales et attributaires) cohérentes.

Les méthodes d'analyse considérées portent sur (1) les risques liés aux inondations (marines et/ou continentales), (2) les risques liés aux glissements de terrain (superficiels, profonds, etc.) et (3) le multirisques. Afin d'adapter par la suite les différents éléments exposés et critères à un contexte d'environnement côtier à falaise, la précision spatiale des méthodes d'analyses considérées doivent être comprises entre une échelle moyenne à une l'échelle locale (1 : 100 000 à 1 : 2 000). Les risques sismiques, volcaniques, torrentiels, etc. sont moins significatifs ou absents sur les territoires côtiers à falaise de Normandie et ne sont par conséquent pas intégrés dans la synthèse bibliographique.

2.2.2.1. Les méthodes d'analyse des risques liés aux inondations

Cinq méthodes d'analyse des risques liés aux inondations (continentales et marines) utilisées par huit différents auteurs sont identifiées (Tableau 2.1). En l'absence d'acronyme défini par les auteurs, les initiales du premier auteur ont été utilisées pour qualifier les méthodes. Les méthodes d'analyse *CB* (Camarasa Belmonte *et al.*, 2011), *SH* (Scheuer *et al.* 2011) et *V.I.E.* « *Vulnérabilité Intrinsèque Extrême* » (Hénaff *et al.*, 2014 ; Créach, 2015) ont été élaborées dans un contexte littoral et pour des inondations marines type submersion. Les méthodes *FloodCalc Urban* « *Flood risk Calculation in Urban context* » (Kubal *et al.*, 2009 ; Meyer *et al.*, 2009a, 2009b) et *VJ* (Vojinovic *et al.*, 2016) ont été développées dans un contexte d'inondation continentale par débordement de cours d'eau lent.

Les éléments exposés utilisés sont hétérogènes entre les différentes méthodes et semblent indépendants du contexte de l'étude. Deux groupes se distinguent (Tableau 2.1) : (1) les méthodes considérant exclusivement les infrastructures telles que les bâtiments et les réseaux (méthodes *SH*, *V.I.E.* et *VJ*) et (2) les méthodes considérant les limites juridiques (zones urbaines), les infrastructures (bâtiment et réseaux de transport), la population ainsi que les surfaces agricoles et naturelles (méthodes *CB* et *FloodCalc Urban*).

Tableau 2.1 Éléments exposés et critères définis pour différentes méthodes d'analyse des risques liés aux inondations (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.*, 2019a)

Méthode	EE (Critères)	Attributs utilisés	Scénario	Site d'étude
Méthode CB [1]	Population (estimée)	Faible, moyen, fort, très dense	J. travail (8-20 h)	Espagne
	Zone urbaine (type)	Administration, commerce, etc.	Nocturne (20-8h)	(Valence)
	Zone agricole(type)	Terres arables, légumes, etc.	Vacances (8-20 h)	
	Zone naturelle (type)	Forêt, pâturage, lagon, etc.		
FloodCal Urban [2; 3; 4; 5]	Transport (type)	Rues, routes, rails, etc.	50 ans	Allemagne
	Bâtiment (fonction)	Résidentiel, commercial, etc.	100 ans	(Leipzig)
	Zone urbaine (type)	Foire, terrain de sport, ZU, etc.	200 ans	
	Bâtiment (valeur)	Valeur foncière (€)		
	Population (estimée)	1, [2 – 3], [4 – 6], etc.		
	Population (CSP)	Enfants, chômeurs, cadre, etc..		
	Zone naturelle (type)	Forêt, sites contaminés, etc.		
Méthode SH [5]	Bâtiment (étage)	1, 2, [3-4], etc.	Vagues de 5 m	Égypte
	Bâtiment (M.C.)	Béton, traditionnel, mortier, etc.	Vagues de 9 m	(Alexandrie)
	Bâtiment (env.)	Distance à la côte [20 m, etc.]		
V.I.E. [6 ; 7]	Bâtiment (env.)	Profondeur, distance (refuge), etc.	Aucun	France
	Bâtiment (étage)	1 étage sans ouverture sup., etc.		(Loire)
Méthode VJ [8]	Bâtiment (type)	Maison avec pilier, 2 étages, etc.	Période d'affluence	Thaïlande
	Bâtiment (fonction)	Hôpital, station de police, etc.	Hors affluence	(Ayutthaya)
	Transport (M.C.)	Route en asphalte, en gravier, etc.		

M.C. : matériaux de construction. CSP : catégorie socioprofessionnelle, Env. : environnement. [1] Camarasa Belmonte *et al.* (2011) ; [2] Kubal *et al.* (2009) ; [3] Meyer *et al.* (2009a) ; [4] Meyer *et al.* (2009b) ; [5] Scheuer *et al.* (2011); [6] Hénaff *et al.* (2014) ; [7] Créach (2015); [8] Vojinovic *et al.* (2016).

Le critère le plus couramment utilisé pour caractériser les éléments exposés est le type (sept occurrences) c'est-à-dire la caractéristique physique de l'élément (e.g. maison, appartement, route, etc.). La fonction, le nombre d'étages, les matériaux de construction, la population estimée et l'environnement direct des éléments exposés (deux occurrences pour chaque critère) sont les deuxièmes critères les plus utilisés. La valeur monétaire et la catégorie socioprofessionnelle sont utilisées qu'une seule fois.

Les éléments exposés considérés et les critères sont utilisés dans le cadre d'une analyse de la vulnérabilité structurelle (type, nombre d'étage, matériaux de construction, environnement direct), physique (humaine – population estimée), fonctionnelle (fonction, valeur foncière) et sociale (catégorie socioprofessionnelle).

2.2.2.2. Les méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain

Cinq méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain (rotationnel, translationnel, superficiel, profond, rapide, lent, etc.) utilisées par neuf auteurs sont identifiées (Tableau 2.2). La méthode *PDI* « *Potential Damage Index* » (Maquaire *et al.*, 2004 ; Puissant *et al.*, 2006, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) et la méthode *BI* (Bianchini *et al.*, 2017) ont été développées dans un contexte montagneux alpin. La méthode *PDI* a été adaptée à un contexte littoral normand par Lissak (2012). La méthode *UZ* (Uzielli *et al.*, 2015) a été développée à un contexte littoral en Italie. Les méthodes *PK* (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007) et *CS* (Cascini *et al.*, 2013) ont été utilisées dans contexte de piedmont alpin.

Les éléments exposés utilisés sont assez homogènes pour l'ensemble des méthodes d'analyse répertoriées. Les bâtiments sont utilisés dans les cinq méthodes et les quatre autres méthodes comprennent en plus les réseaux de transport et les unités juridiques (zones urbaines). Les

surfaces agricoles et naturelles n'apparaissent que dans trois méthodes d'analyse (*PDI*, *PK* et *BI*). Pour ces trois méthodes, les zones naturelles comprennent les zones d'intérêt écologique. Les réseaux d'énergie (ou *lifelines*) sont utilisés exclusivement dans les méthodes PDI et *PK*. La population présente sur un territoire est définie à travers les bâtiments en attribuant une valeur ou en utilisant des scénarios (e.g. période estivale ou hivernale, période de travail ou de nuit, etc.).

Tableau 2.2 Éléments exposés et critères définis pour différentes méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.,* 2019b)

Méthode	**EE (Critères)**	**Attributs utilisés**	**Scénario**	**Site d'étude**
PDI	Bâtiment (type)	Logement, entrepôt, etc.	Période estivale	France (Alpes)
[1 ; 2 ; 3 ;	Bâtiment (fonction)	Éducation, urgence, etc.	Période hivernale	
4 ; 5]	Bâtiment (étage)	>6, 3-6, <3, etc.		
	Bâtiment (état)	Bon, modéré, etc.		
	Bâtiment (M.C.)	Béton, traditionnel, etc.		
	Bâtiment (âge)	>1900, 1970-1990, etc.		
	Population (estimée)	0, <3, [3-6], etc.		
	Transport (fonction)	Route stratégique, servitude, etc.		
	Réseau d'énergie (type)	Lignes, transformateur, etc.		
	Zone urbaine (type)	Centre urbain, camping, etc.		
	Zone agricole (type)	Pâturage, cultures, prairie, etc.		
	Zone naturelle (type)	Forêt, roche nue, eau, etc.		
Méthode	Bâtiment (fonction)	Éducation, urgence, etc.	Période estivale	Allemagne
PK [6]	Bâtiment (M.C.)	Béton, traditionnel, etc.	Période hivernale	(Swabian Alb)
	Bâtiment (âge)	>1900, 1970-1990, etc.	Jour (8-20 h)	
	Bâtiment (protection)	Sans murets, murets (pierre), etc.	Nuit (20-8 h)	
	Bâtiment (étage)	>6, 3-6, <3, etc.		
	Transport (fonction)	Route stratégique, réseau, etc.		
	Réseau d'énergie (type)	Lignes, transformateur, etc.		
	Zone urbaine (type)	Centre urbain, camping, etc.		
	Zone agricole (type)	Pâturage, cultures, prairie, etc.		
	Zone naturelle (type)	Forêt, roche nue, eau, etc.		
Méthode	Bâtiment (état)	Avec ou sans dégât	Aucun	Italie (Volturno)
CS [7]	Route (état)	Avec ou sans dégât		
	Zone urbaine (type)	Centre, zone résidentielle, etc.		
Méthode	Bâtiment (M.C.)	Béton, traditionnel, etc.	Aucun	Italie (Ancona)
UZ [8]	Bâtiment (protection)	Sans murets, murets (pierre), etc.		
	Bâtiment (étage)	>6, [3-6], <3, etc.		
	Bâtiment (âge)	>1900, 1970-1990, etc.		
	Bâtiment (fondation)	Socles, coulés en béton, etc.		
Méthode	Bâtiment (fonction)	Administration, industrie, etc.	Aucun	Italie (Volterra)
BI [9]	Zone urbaine (type)	Camping, complexes, etc.		
	Zone agricole (type)	Terres cultivées, vignoble, etc.		
	Zone naturelle (type)	Prairie, bois, etc.		
	Transport (fonction)	Autoroute, péage, etc.		

M.C. : matériaux de construction, âge : date de construction du bâtiment. [1] Maquaire *et al.* (2004) ; [2] Puissant *et al.* (2006) ; [3] Lissak (2012) ; [4] Puissant *et al.* (2013) ; [5] Carlier *et al.* (2018) ; [6] Papathoma-Köhle *et al.* (2007) ; [7] Cascini *et al.* (2013) ; [8] Uzielli *et al.* (2015) ; [9] Bianchini *et al.* (2017).

Le critère le plus utilisé pour décrire les éléments exposés au regard des méthodes d'analyse des risques aux glissements de terrain est le type (12 occurrences). La fonction est le deuxième critère le plus utilisé (sept occurrences). L'état des infrastructures, le nombre d'étages, les matériaux de construction utilisés et l'âge (date de construction) sont les troisièmes critères les

plus utilisés (trois occurrences chacun). La population estimée par bâtiment ainsi que les protections (environnement direct) sont spécifiques à la méthode *PDI*, *PK* et *UZ* (une occurrence).

Les éléments exposés considérés et critères utilisés sont prévus pour une analyse de la vulnérabilité structurelle (type, matériaux de construction, état de la structure, date de construction, nombre d'étages, fondation, protection), physique (humaine – population estimée) et fonctionnelle (fonction) des éléments exposés. Des adaptations de la méthode *PDI* (renommée *GPDI*) sont réalisées par Carlier *et al.* (2017) afin de considérer la vulnérabilité sociale (e.g. connaissance du risque, catégorie socioprofessionnelle, etc.).

2.2.2.3. Les méthodes d'analyse multirisques

Les méthodes d'analyse multirisques sont communément utilisées à des échelles nationales, voire globales, avec des unités spatiales d'observation communales (Dilley *et al.*, 2005 ; Delmonaco *et al.*, 2006 ; Schmidt *et al.*, 2011 ; Garcia-Aristizabal *et al.*, 2015 ; Gallina *et al.*, 2016). Trois méthodes d'analyse multirisques, comprises pour des échelles moyenne et locale, utilisées par quatre auteurs ont été identifiées (Tableau 2.3). Les trois méthodes, *RVI. « Relative Vulnerability Index »* (Kappes *et al.*, 2012a ; van Westen *et al.*, 2014), *GO* (Godfrey *et al.*, 2015) et *CH* (Chen *et al.*, 2016) ont été développées dans un contexte montagnard.

Les éléments exposés des différentes méthodes présentées sont localisés dans les fonds de vallées et correspondent à des petites villes, des villages ou des hameaux sur les versants. Toutes ces méthodes considèrent les bâtiments. La méthode *RVI* et la méthode *CH* considèrent la population (estimée) par bâtiment. Cette méthode *CH* intègre également les unités juridiques (zones urbaines) en tant qu'éléments exposés (Tableau 2.3). Contrairement aux méthodes d'analyses des risques liés aux inondations et aux glissements de terrain, les zones agricoles et naturelles ne sont pas prises en compte dans les méthodes d'analyses multirisques.

Tableau 2.3 Éléments exposés et critères définis pour différentes méthodes d'analyse multirisques (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.*, 2019b)

Méthode	EE (Critères)	Attributs utilisés	Scénario	Site d'étude
RVI	Bâtiment (M.C)	Pierre, maçonnerie, béton, etc.	Jour (été/hiver)	France
[1 ; 2]	Bâtiment (étage)	>6, [3-6], <3, etc.	Nuit (été/hiver)	(Barcelonnette)
	Bâtiment (protection)	Sans murs, murs (pierre), etc.	Séisme	
	Bâtiment (alerte)	Présence (ou absence)	Glissement	
	Population (estimée)	1, [2 - 3], etc.	Inondation	
	Bâtiment (fonction)	Hôpital, école, etc.	Tempête	
Méthode	Bâtiment (étage)	>6, [3-6], <3, etc.	Inondation	Roumanie
GO [3]	Bâtiment (protection)	Ouvertes devant la pente, etc.	Crue éclaire	(Nehoiu Valley)
	Bâtiment (M.C.)	Fissures dans la structure, etc.	Glissement	
	Bâtiment (fondation)	Socle en béton, pierre, etc.	L.T.	
Méthode	Bâtiment (fonction)	Commerce, industrie, etc.	Inondation	Italie
CH [4]	Bâtiment (M.C.)	Brique, béton, etc.	L.T.	(Fella river
	Bâtiment (valeur)	[5000- 15.000 €], etc.	Crue éclaire	valley)
	Population (estimée)	[1-2 personne par bâti], etc.		
	Zone urbaine (type)	Zone d'activité, de loisir, etc.		

M.C. : matériaux de construction, L.T. : laves torrentielles. [1] Kappes *et al.* (2012a) ; [2] van Westen *et al.* (2014) ; [3] Godfrey *et al.* (2015) ; [4] Chen *et al.* (2016).

Les critères utilisés pour décrire les éléments exposés sont hétérogènes. Les matériaux de construction sont utilisés systématiquement pour les trois différentes méthodes (trois

occurrences). La fonction, le nombre d'étages, la population (estimée), les systèmes de protection ne sont pas récurrents pour chacune des méthodes (deux occurrences). La valeur foncière et la présence de fondation sont spécifiques à la méthode *GO* et les systèmes d'alerte sont spécifiques à la méthode *RVI*.

Les éléments exposés et critères utilisés sont spécifiques à une analyse de la vulnérabilité structurelle (matériaux de construction, nombre d'étages, système de protection) et physique (humaine – population estimée et système d'alerte) des éléments exposés. La vulnérabilité fonctionnelle est considérée exclusivement dans la méthode *CH* (fonction).

2.2.3. Choix des éléments exposés et critères retenus à différentes échelles spatiales

Les 13 méthodes d'analyse des risques identifiées (comprises entre une échelle moyenne à locale) nécessitent d'être synthétisées et croisées aux modes de représentation des données géographiques à différentes échelles spatiales d'analyse. L'ensemble doit être adapté à un contexte d'environnement côtier à falaise soumis à des processus multiples. Les critères utilisés amènent alors à mieux comprendre les impacts structuraux (*i.e.* la forme et les éléments constitutifs d'un élément construit), corporels (*i.e.* pertes humaines envisageables) et fonctionnels (*i.e.* l'activité et le rôle d'un élément construit ou naturel) des éléments exposés présents sur les territoires d'étude. Les échelles considérées et des critères doivent être complémentaires et interconnectés.

Ainsi, cette section présente l'identification des principaux éléments exposés et des critères pouvant être intégrés selon différents types de risque considérés sur la base de la revue bibliographique portant sur les méthodes d'analyse des risques (section 2.2.3.1) et les choix d'attribution des différents critères déterminés aux éléments exposés en fonction des modes de représentation (unité spatiale d'observation) à différentes échelles spatiales (section 2.2.3.2).

2.2.3.1. Des éléments exposés et critères adaptés selon les catégories de vulnérabilité

Sur les 13 méthodes d'analyse des risques (inondations, glissements de terrain et multirisques), 69 éléments exposés et critères ont été identifiés : 19 déterminés à partir des analyses des risques liés aux inondations, 35 à partir des analyses des risques aux glissements de terrain et 15 à partir des analyses multirisques (Figure 2.4). Les deux tiers (66 %) des éléments exposés considérés sont des bâtiments avec 12 critères utilisés pour les décrire et les caractériser. Les zones urbaines sont les deuxièmes éléments les plus utilisés (9 %) dans les différentes méthodes d'analyse des risques avec les zones naturelles (8 %) pour un critère de description (le type). Les réseaux de transport sont représentés à 7 % et trois critères sont utilisés pour leur description : le type, les matériaux de construction et l'état du réseau. Les zones agricoles (6 %) et réseaux d'énergies (3 %) sont les moins représentés avec seulement un critère de description (le type).

Pour les bâtiments, 12 critères ont été identifiés et employés 44 fois toutes méthodes confondues. Par ordre d'importance en termes d'utilisation, il est possible de retenir que :

(1) Les critères les plus utilisés sont la fonction (16 %), les matériaux de construction (16 %) et le nombre d'étages (16 %) ;

(2) Les critères utilisés régulièrement sont le nombre de personnes estimé par bâtiment (11 %), les moyens de protection (11 %) et la date de construction du bâtiment (7 %) ;

(3) Les critères les moins souvent utilisés sont le type de bâtiment (5 %), le niveau de dégradation (5 %), les fondations du bâti (5 %) et la valeur foncière (5 %) ;

(4) Les critères rarement utilisés sont la présence de système d'alerte (2 %), la sensibilité du bâti (2 %).

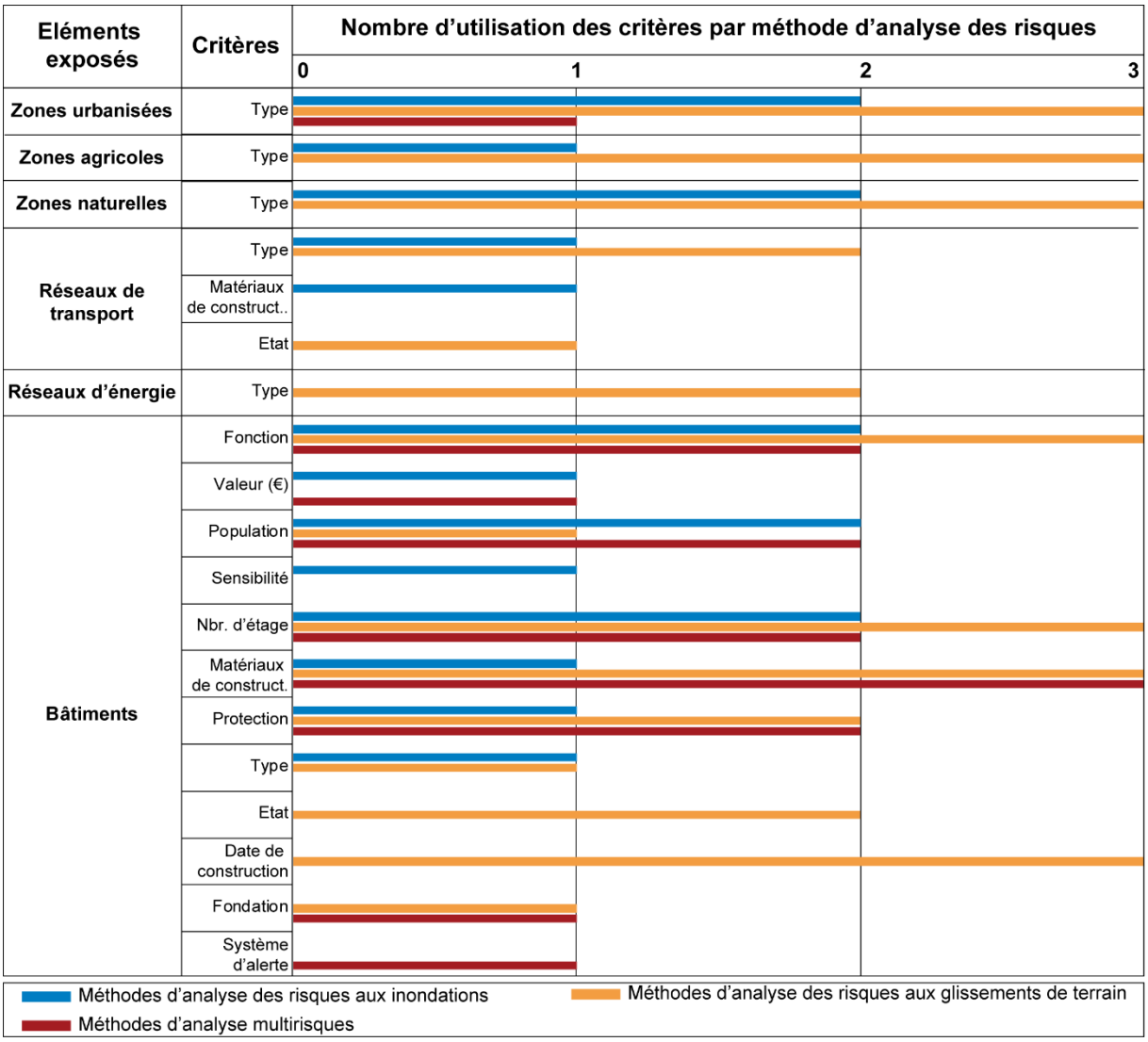


Figure 2.4 : Synthèse des éléments exposés et des critères considérés dans 13 méthodes d'analyse des risques (inondation, glissement de terrain, multirisques) (Graff *et al.*, 2019b)

Le développement méthodologique doit amener à une analyse de l'intégrité physique des personnes (corporelle), de la structure (matérielle), de la fonction (activité) et des éléments présents au sein d'un territoire d'étude. Au regard des critères utilisés dans les différentes méthodes d'analyse des risques, nous avons choisi de regrouper les critères les plus couramment utilisés au sein de **trois catégories de vulnérabilité** :

- **Vulnérabilité physique (corporelle) :** (1) le nombre de personnes estimé par bâtiment, (2) le trafic des réseaux de transport ;
- **Vulnérabilité structurelle :** (1) le type (*i.e.* la caractéristique physique de l'élément exposé), (2) le nombre d'étages, (3) les matériaux de construction, (4) la date de construction, (5) l'état du bâtiment, (6) le nombre de voies (réseaux) ;

- **Vulnérabilité fonctionnelle :** (1) la fonction des infrastructures, (2) le type de réseaux (autoroutes, routes nationales, etc.) et (3) le type de surface (urbaine, agricole, naturelle, etc.).

La **vulnérabilité physique (corporelle)** est une des plus complexes à représenter et à prendre en compte, car la population est par définition mobile et changeante. Nous avons fait le choix, dans cet exercice, de considérer le nombre de personne au sein des bâtiments résidentiels, car c'est finalement l'un des critères engendrant le moins d'incertitudes (Kunze et Hecht, 2015 ; Xie *et al.*, 2019). Des scénarios peuvent être émis sur les mouvements de population au sein des infrastructures résidentielles et non résidentielles, mais restent théoriques en l'absence de données fournies pour chaque bâtiment. Bien qu'il ne soit pas utilisé dans les 13 méthodes analysées, nous avons intégré le critère trafic (*i.e.* circulation des personnes) dans la vulnérabilité physique (corporelle) pour les réseaux de transport (Dutta *et al.*, 2001 ; Veldhuis, 2011 ; Zahran *et al.*, 2017).

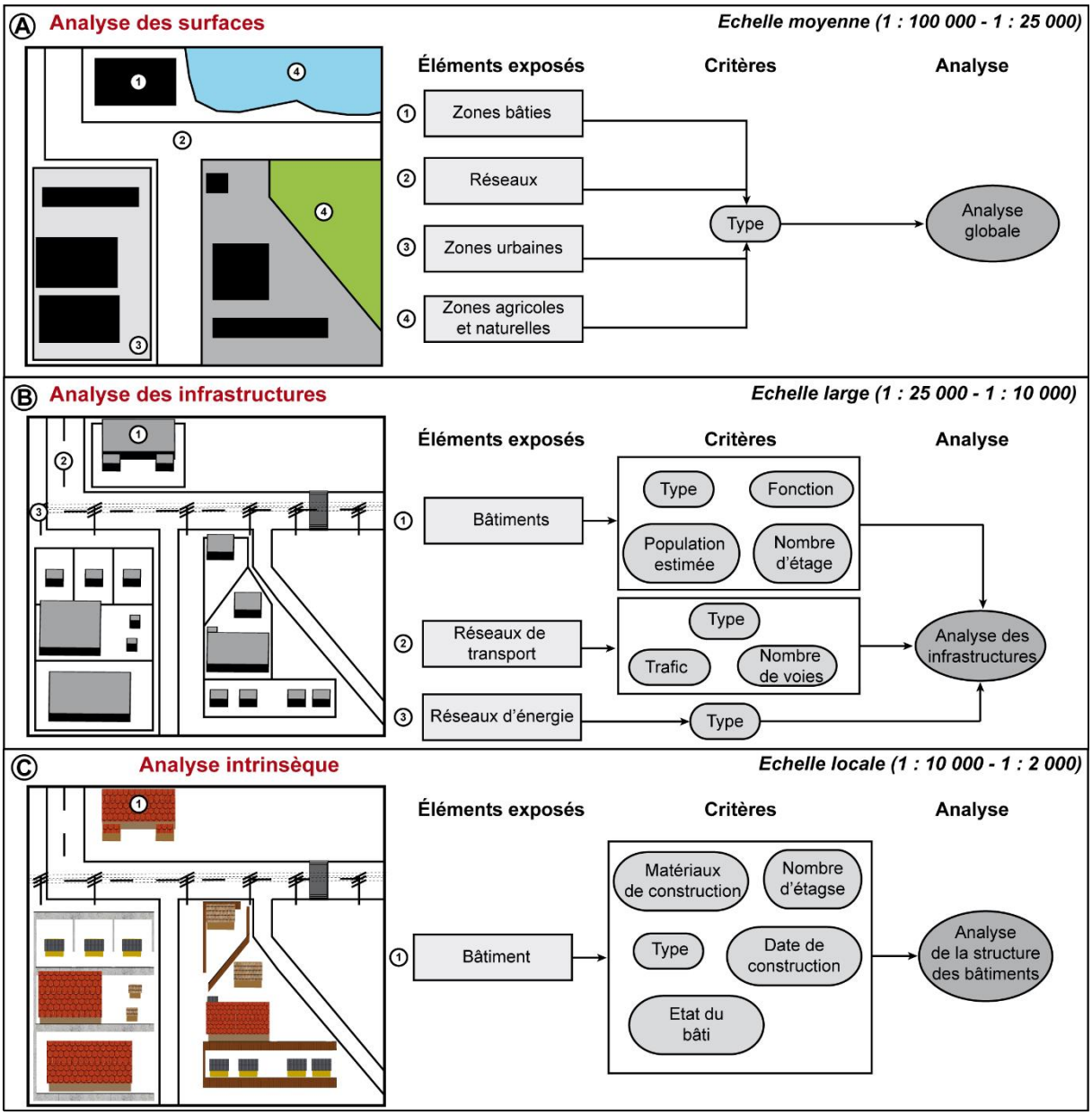
Pour la **vulnérabilité structurelle**, nous avons retenu les critères « type », nombre d'étages, matériaux de construction, date de construction et l'état (condition) des bâtiments, car ces critères sont classiquement utilisés. Principalement utilisés pour évaluer l'impact des avalanches et des laves torrentielles sur les éléments exposés, nous n'avons pas retenu les moyens de protection (présence d'un muret, d'une barrière, d'un mur en pierre, nombre de fenêtres, etc.) et la nature des fondations (Akbas *et al.*, 2009 ; Jakob *et al.*, 2012 ; Kang et Kim, 2016 ; Ciurean *et al.*, 2017 ; Carlier *et al.*, 2018). De plus, nous n'avons également pas considéré la valeur foncière, car, dans des secteurs à haute activité touristique, ce critère relève d'une perception sociale des éléments exposés (Zhai *et al.*, 2006 ; Peng *et al.*, 2013). Pour les réseaux de transport, nous avons utilisé le nombre de voies afin d'apporter une meilleure caractérisation de la structure des réseaux de transport (Yu *et al.*, 2006).

Enfin, nous avons utilisé les critères « fonction » et « type » afin d'évaluer la **vulnérabilité fonctionnelle**, qui est liée à l'activité ou au rôle économique de l'élément exposé. Dans le cas de limites physiques (*i.e.* des infrastructures), le critère fonction est utilisé. Dans le cas de limites non matérialisées au sol (e.g. zones naturelles, zones bâties, etc.) ou juridiques (e.g. zones urbaines, zones agricoles, etc.), le critère « type » est plus adapté pour décrire la fonction de l'élément exposé.

2.2.3.2. Adaptation des critères aux échelles spatiales

Une fois l'ensemble des critères d'analyses déterminés, nous avons dû les assigner aux éléments exposés pour les différentes échelles spatiales. Les échelles d'analyse considérées s'étendent de l'échelle moyenne (1 : 100 000 au 1 : 25 000) à l'échelle locale (1 : 10 000 au 1 : 2 000). Au-delà de l'échelle moyenne (échelle régionale), les critères utilisés sont les mêmes que ceux utilisés à l'échelle moyenne (« type ») et seul le degré de généralisation des éléments exposés va augmenter.

L'interconnexion des échelles spatiales doit nécessairement comprendre l'attribution d'un degré de généralisation des éléments exposés ainsi qu'un niveau de complexification du nombre de critères utilisés (Buttenfield et McMaster, 1991 ; Weibel and Dutton, 1999 ; Jones et Mark Ware, 2005 ; Gulgen et Gokgoz, 2008 ; Li et Wong, 2010 ; Geiger *et al.*, 2015).



(A) Mode de représentation avec un degré de généralisation moyen afin d'obtenir une information globale de la fonction des éléments exposés ; (B) Mode de représentation des éléments exposés focalisés sur les infrastructures d'un territoire avec un degré de précision fort afin d'obtenir une information précise sur la structure, la fonction et les éléments physiques (corporels) des éléments exposés ; (C) Mode de représentation des éléments exposés focalisés sur la structure des bâtiments afin d'obtenir une information très précise des éléments structurants d'un bâtiment.

Figure 2.5 : Éléments exposés et critères d'analyse considérés aux différentes échelles spatiales (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.*, 2019b)

La synthèse des modes de représentation et des critères utilisés dans les 13 méthodes d'analyse de risque analysées amène à retenir la structuration suivante (Figure 2.5) :

(1) *À l'échelle moyenne,* sur la base d'une analyse des surfaces, une information générale de la fonction est fournie sur les quatre types de surface (zones bâties, réseaux, zones urbaines, zones agricoles et naturelles) présents au sein d'un territoire d'étude. Seul le critère d'analyse « type » est retenu pour chacun des éléments exposés permettant une analyse globale (conséquences globales) ;

(2) *À l'échelle large*, une information plus précise sur les infrastructures (bâtiments, réseaux de transport et réseaux d'énergie) est fournie afin de pouvoir entreprendre une analyse des infrastructures (conséquences sur les infrastructures) identifiant les aspects physiques (corporels), structurels et fonctionnels. Selon les éléments exposés considérés, un à quatre critères d'analyse sont retenus. Par exemple, pour les bâtiments, les quatre critères sont « type, fonction, population estimée et nombre d'étages », alors que pour les réseaux d'énergie, seul le critère « type » est retenu ;

(3) *À l'échelle locale*, l'analyse dite « intrinsèque » porte sur les seuls bâtiments mais avec des informations très précises sur ces éléments structurants pour évaluer ensuite les conséquences sur la structure des bâtiments. Ainsi, cinq critères d'analyses sont retenus par élément exposé (bâtiment) : matériaux de construction, nombre d'étages, type, date de construction et état du bâti.

2.2.4. Conclusion

Sur la base de l'analyse bibliographique portant sur 13 méthodes d'analyse des risques liés soit aux inondations, soit aux glissements de terrain ou encore à ces deux phénomènes (multirisques), nous avons pu identifier les principaux éléments exposés et les critères pouvant être intégrés selon trois échelles spatiales (moyenne, large et locale).

Les analyses de risques examinées considèrent communément une échelle spatiale à laquelle a été associé un mode de représentation des éléments exposés. La connexion entre les échelles spatiales d'analyse est rare, car elle nécessite soit une généralisation des éléments exposés (*upscaling*), soit un plus grand degré de précision (*downscaling*). Ces effets par emboîtement d'échelle requièrent donc des modifications au sein même de l'unité spatiale considérée (régulière ou irrégulière) et une adaptation aux échelles préalablement déterminées.

Pour pouvoir caractériser ces unités spatiales, plusieurs différents critères sont nécessaires. Au regard de la littérature scientifique, les éléments exposés considérés au sein d'un territoire concernent les infrastructures (bâtiments), les réseaux (transport et énergie) ainsi que les différentes surfaces urbaines, agricoles et naturelles. Les critères d'analyse sont ensuite adaptés selon : (1) l'unité spatiale considérée (zone urbaine, zone agricole, bâtiment) et (2) l'échelle spatiale utilisée (moyenne, large, locale, etc.).

Les unités spatiales et critères attribués permettent alors d'identifier et de caractériser la composante physique (corporelle), structurelle et fonctionnelle des éléments exposés présents au sein d'un territoire d'étude. Les éléments exposés (appelés aussi parfois unités spatiales d'observation -Daniel *et al.*, 2017 ; Saint-Martin *et al.*, 2018-) et les critères d'analyse utilisés font appel à l'utilisation de bases de données géographiques sous des systèmes d'information géographique (SIG).

La mise en place de cette méthode nécessite une importante quantité d'informations qui ne peuvent être recueillies par un seul opérateur sur plusieurs milliers de bâtiments et sur de vastes superficies. Les différents sites d'étude étant particulièrement bien fournis en bases de données, nous avons donc fait le choix de nous tourner vers un système de compilation des bases de données afin de caractériser les éléments exposés et les critères d'analyse (ce qui est maintenant détaillé dans la section 2.3 suivante).

2.3. Modèles d'intégration et d'harmonisation des bases de données

Pour pouvoir spatialiser et caractériser les éléments exposés par des critères d'analyse, des données géographiques sont bien évidemment nécessaires. Ces données se définissent à partir de coordonnées (le système de coordonnées utilisé sur les sites d'étude est le RGF/Lambert 93) et de valeurs attributaires associées aux éléments exposés. La phase d'acquisition et de préparation des données représente donc l'étape initiale à l'ensemble des méthodes d'analyse des risques. Deux alternatives sont envisageables pour récupérer ces données selon le contexte de l'étude : (1) les données sont produites par un ou plusieurs opérateurs par acquisition sur le terrain et sont compilées dans un système d'information géographique (SIG), (2) les données existent déjà, mais se présentent sous différentes formes et sont détenues par différents opérateurs connectés ou non entre eux. Traditionnellement les données sont récupérées sur le terrain pour qu'elles puissent répondre à un objectif et à une échelle spatiale donnée. Dans le cas d'un projet d'analyse multirisques comprenant plusieurs objectifs, sur des territoires assez étendus et assez fortement urbanisés comprenant plusieurs milliers d'éléments exposés (par exemple entre 20 000 et 40 000 bâtiments par site), l'utilisation de bases de données existantes s'avère être la seule alternative efficace.

L'utilisation de multiples bases de données existantes implique la réalisation d'un inventaire des bases de données présentes sur l'ensemble des territoires d'étude ainsi que d'un contrôle qualité de l'information apportée. Ce contrôle permet de faire un tri en termes de précision spatiale et temporelle des données (section 2.3.1). Ces bases de données provenant de différentes sources nécessitent une harmonisation et une combinaison. Cette harmonisation s'opère au sein d'un cube de données multidimensionnel (Vassiliadis *et al.*, 2002) sur la base d'un fonctionnement de modèle ETL (*Extraction Transformation Loading*) (section 2.3.2). Puis, au sein même de ces modèles s'opèrent des systèmes de combinaison entre données provenant de différentes sources d'information. Sur la base de ces modèles, un essai d'automatisation (partielle) du processus d'harmonisation et de diffusion sous forme de *toolbox* est réalisé (section 2.3.3).

2.3.1. Inventaire et évaluation des bases de données géographiques

L'utilisation de multiples bases de données géographiques pour identifier les éléments exposés à différentes échelles spatiales est relativement récente dans les analyses de risque (Jokar Arsanjani *et al.*, 2015 ; Calazans Campelo *et al.*, 2017 ; Johansson *et al.*, 2017). L'utilisation croissante de ces bases de données est liée au développement progressif des sources de données produites et mises à disposition du plus grand nombre d'utilisateurs (e.g. Institut national de l'information géographique et forestière –IGN-, Google, Geofabrik, etc.) ainsi que des plateformes de distribution de l'information (e.g. Géoportail, data.gouv.fr, sandre.fr, etc.). Les bases de données mises à disposition par les différentes plateformes évitent ainsi la collecte longue et fastidieuse des données sur le terrain ou par photo-interprétation d'images aériennes (Defossez *et al.*, 2017 ; Ambrosi *et al.*, 2018), en dehors des contrôles de qualité des données éventuellement nécessaires selon les objectifs retenus (échelles, précisions, …).

La caractérisation des éléments exposés sert de base d'analyse et les données utilisées doivent donc être vérifier en termes de qualité spatiale et attributaire de l'information (section 2.3.1.1). Les bases de données retenues après le contrôle qualité de l'information seront ensuite présentées selon les trois échelles spatiales retenues (2.3.1.2).

2.3.1.1. Détermination de la qualité des données et de la pertinence de l'information

Deux modèles de production des données sont adoptés par les organismes spécialisés depuis ces dernières années (Girres et Touya, 2010) : (1) La production de données « classique » consiste à utiliser un nombre important de tacticiens pour obtenir une information précise et sur de vastes surfaces, rapidement et à moindre coût (Tapscott et Williams, 2007) ; (2) La production de données participatives grâce à la démocratisation du GPS, en parallèle avec le développement d'application (smartphone) et d'interfaces simples d'utilisation, permet d'augmenter exponentiellement le nombre d'opérateurs potentiels (*Volunteered Geographic Information*) pouvant produire de la donnée en libre accès (Goodchild, 2007 ; Sui, 2008). Les données produites dans un cadre administratif et/ou juridique (*i.e.* zone urbaine pavillonnaire, zone d'habitat collective, zone d'activité économique, etc.) relèvent de textes de lois (code de l'urbanisme, plan local d'urbanisme, schéma de cohérence territoriale, etc.). Les primitives (points, lignes, polygones) produites dans ce contexte ne peuvent donc être ni comparées ni mesurées en termes de précision spatiale.

Sur le modèle de production de données n°1 (*cf.* ci-dessus), l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a développé entre 2000 et 2008, le Référentiel à Grande Échelle (RGE®) à partir d'orthophotographies, de photogrammétrie, de MNT, de parcelles cadastrales et d'adresses. Le RGE® possède une précision métrique et sert de référence pour l'ensemble des données géographiques concernant le territoire français (OpenStreetMaps®, Google maps®, etc.). Ainsi, chaque organisme spécialisé dans la production des données géographique doit réaliser un contrôle qualité des primitives et des composantes de l'information fournie par comparaison avec le RGE® (Girres et Touya, 2010 ; Haklay, 2010). Plusieurs éléments (ou composantes) sont proposés pour établir le contrôle qualité des données géographiques (Goodchild *et al.*, 1992 ; Vauglin, 1997 ; Guptill et Morrison, 1995 ; Kresse et Fadaie, 2003 ; Girre et Touya, 2010). Pour le **contrôle des primitives**, il s'agit de contrôler :

- La *précision géométrique* qui évalue la position et la résolution géométrique venant de la réalité du terrain ;
- Le *lignage* qui correspond à la présence ou à l'absence de décalage entre les objets modélisés et la réalité terrain ;
- La *cohérence logique* qui évalue le degré de cohérence interne des règles de modélisation et de conformité des données (Servigne *et al.*, 2000) ;
- Le *caractère complet des données* avec la mesure de l'absence de données dans la base de données et la présence d'excès de données dans la base de données.

Le **contrôle des attributs** s'appuie sur :

- La *précision sémantique* qui est portée par les objets correspondant à la réalité terrain ;
- La *précision temporelle* selon le millésime ou la mise à jour des informations au sein de la base de données relative aux changements à la réalité terrain ;
- La *précision attributaire* qui évalue la précision quantitative des attributs, la justesse de la donnée qualitative et de la classification des attributs ;
- L'*usage*, c'est-à-dire comment la base de données répond aux objectifs initialement émis.

Sur cette base de contrôle de qualité des bases de données, un système d'évaluation devient nécessaire pour évaluer l'apport et la précision que peut apporter chaque base de données provenant de différentes sources d'information. Ce système d'évaluation n'est pas prévu pour évaluer la précision des primitives et la cohérence des modèles utilisés par le fournisseur, mais de déterminer la précision à laquelle a été prévue la donnée fournie et de définir l'apport par rapport à d'autres jeux de données venant de différentes sources.

Pour les trois sites d'étude, **29 sources d'information** (e.g. Gaspar, Carthage, IGN, Corine Land Cover, Géofla, Géollitoral, Registre Parcellaire Graphique (RPG), Carmen, etc.) fournissant **218 bases de données géographiques** ont été identifiées. Ces 218 bases de données ont été soumises à un système d'évaluation fonctionnant en **quatre étapes** (Figure 2.6).

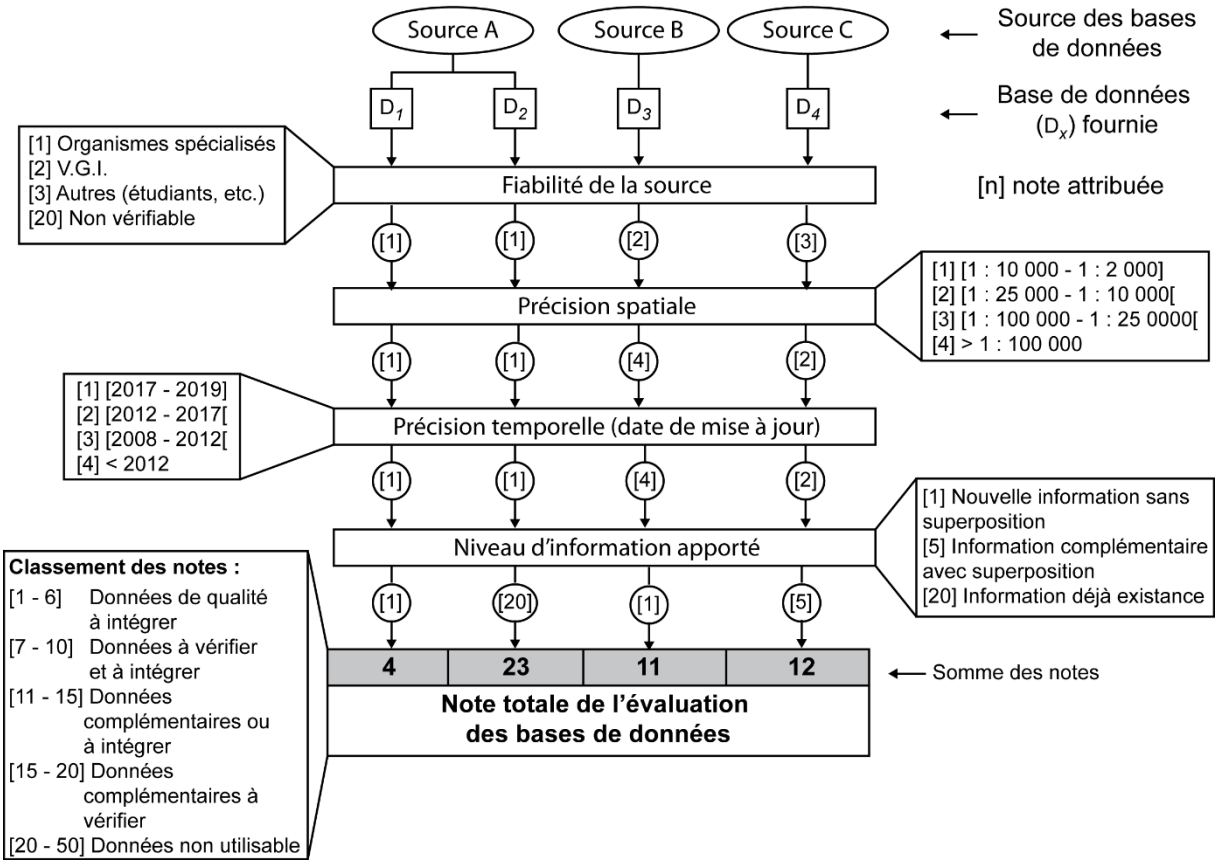


Figure 2.6 : Système d'évaluation utilisé dans le contrôle qualité des bases de données géographique pour la caractérisation des éléments exposés

À chaque étape, le système de notation mit en place attribut une note selon la précision de l'information. Plus la note est élevée, plus le degré d'incertitude est important. La somme de ces notes permet alors d'opérer un tri sur les bases de données à retenir ou à exclure :

(1) *La fiabilité de la source* : l'organisme fournisseur de l'information doit être en mesure de présenter la méthode et la modélisation utilisées dans la production des primitives (Kresse et Fadaie, 2003). Si la source d'information et les bases de données ne sont pas vérifiables, une note de [20] est attribuée ;

(2) *La résolution spatiale des bases de données* : elle détermine l'échelle spatiale prévue pour les différentes bases de données. Pour une précision prévue à l'échelle locale, une note

de [1] sera attribuée, alors que pour une précision prévue au-delà de l'échelle moyenne, la note de [4] sera attribuée ;

(3) *La date de mise à jour de l'information* : elle permet d'estimer la précision temporelle de l'information. Les données mises à jour récemment (2017 – 2019) ont une note attribuée de [1] alors que les données mises à jour avant 2008 ont une note de [4] :

(4) *L'apport et la pertinence des informations* : elles déterminent si la base de données apporte ou pas une nouvelle information comparée aux autres bases de données présentes (si oui, la note de [1] est attribuée). Si la primitive existe déjà, mais qu'un attribut supplémentaire permet de compléter cette primitive (la note de [5] est attribuée). Enfin, si la donnée n'apporte aucune nouvelle information par rapport aux autres bases de données (la note de [20] est attribuée).

À la fin du processus d'évaluation, la somme des notes est réalisée et un classement est opéré en cinq classes. Par exemple, sur la Figure 2.6, les données ayant obtenues un score compris entre 1 et 6 sont considérées comme des « données de qualité à intégrer » et peuvent donc être directement utilisées dans les modèles d'intégration. Dans le cas où une base de données provient d'une source non vérifiable ou que l'information est déjà existante dans la GDB (géodatabase), le score obtenu est compris entre 20 et 50, ce qui permet d'exclure cette base de données des modèles d'intégration (cf. section 2.3.2). Ainsi, sur les 218 bases de données initialement identifiées, **20 bases de données sont finalement retenues** en raison de leur fiabilité, résolution spatiale et temporelle, et de la pertinence de l'information apportée. Durant la phase de veille informationnelle (*i.e.* recherche de nouvelles données), chaque nouvelle base de données identifiée est soumise à ce processus d'évaluation.

2.3.1.2. Les bases de données géographiques utilisées

La phase de recherche, d'acquisition et de contrôle des bases de données géographiques est un processus long nécessitant une veille informationnelle régulière. Dans cet exercice, la veille informationnelle s'est exclusivement concentrée sur les données produites concernant le territoire français (de sources nationales ou internationales). Les bases de données en ligne et accessibles librement ou sous conditions (confidentialité des éléments exposés lors de la diffusion des résultats, citation des sources, etc.) sont principalement utilisées. Ces bases de données se déclinent sous trois types :

- Les *bases de données produites par les organismes spécialisés* (publiques, semi-publiques ou privés) : un contrôle qualité des bases de données fournies est au préalable réalisé par l'organisme de diffusion de l'information ainsi qu'une standardisation et des mises à jour sont réalisées (pluriannuelle, annuelle, mensuelle ou quotidienne). Les données fournies couvrent en général l'ensemble du territoire français ;
- Les *bases de données V.G.I.* (*Volunteered Geographic Information*) : il s'agit de bases de données participatives basées sur le volontariat et le libre échange des informations (Foody *et al.*, 2015 ; Bol *et al.*, 2016). La mise à jour de l'information est en quasi-temps réel (https://www.geofabrik.de/) et les données sont particulièrement bien renseignées dans les secteurs à haute fréquentation. Bien qu'un premier contrôle qualité soit effectué par des groupes spécialisés, ces données requièrent une étape de vérification avant leurs exploitations. De plus, les bases de données V.G.I. ont la particularité d'être produites sur une grande partie de la surface du globale ;
- Les *bases de données issues des archives (inter) communales et régionales* : elles se présentent sous la forme de documents d'urbanisme. Ces documents ne sont pas systématiques sur l'ensemble des municipalités et présentent, même pour des

communes adjacentes, des nomenclatures différentes. Cependant ces documents sont fiables (juridiquement), précis et périodiquement mis à jour. Le ministère de la cohésion des territoires, en partenariat avec l'IGN, a mis en place, entre 2016 et 2020, la plateforme GPU (GéoPortail de l'Urbanisme) d'accès aux données provenant de ces documents d'urbanisme sur l'ensemble du territoire français (https://www.geoportail-urbanisme.gouv.fr/).

À l'échelle moyenne (1 : 100 000 – 1 : 25 000), les zones bâties et les réseaux de transports sont décrites grâce à la BD TOPO (RGE® - IGN) et aux bases de données Open Street Map® (OSM®) (M – Tableau 2.4). Pour les zones urbaines, une plus grande importance est attribuée aux délimitations juridiques indiquées dans les documents d'urbanisme (plans locaux d'urbanisme communaux ou intercommunaux) qui sont régulièrement mis à jour, mais ne sont pas disponibles pour le territoire concerné. La base de données « *MOS Normandie* » est utilisée lorsque la commune est soumise au *Règlement National de l'Urbanisme* (RNU). Cette base de données est disponible, pour l'instant, que pour la Seine-Maritime et renseigne sur l'occupation ainsi que l'usage des sols à une échelle moyenne et large (dernière mise à jour en 2009). Les zones agricoles et naturelles sont déterminées à partir de *cinq sources d'information* : les types de parcelles agricoles sont définis à partir du RPG (Référentiel parcellaire graphique) (source 1) et les limites de ces surfaces à partir de documents d'urbanisme (source 2). Les types de surfaces naturelles et des zones protégées sont déterminés à partir de la BD TOPO® de l'IGN (source 3), de l'INPN (Inventaire national du patrimoine naturel) (source 4) et du CdL (Conservatoire du littoral) (source 5).

À l'échelle large (1 : 25 000 - 1 : 10 000), les informations sur les bâtiments ainsi que sur les réseaux de transport et d'énergie proviennent en grande partie de la BD TOPO® de l'IGN (L – Tableau 2.4). La base de données OSM® est également utilisée pour compléter les données attributaires de l'IGN (e.g. fonction des infrastructures, type de sites touristiques, type de bâtiments d'enseignement, etc.). Ces deux bases de données se complètent en termes de précision attributaire et sémantique. Les primitives de la BD TOPO® sont issues du RGE® et sont donc préférées à celle de OSM®. La population estimée par bâtiment est appréciée par le croisement de la BD TOPO®, OSM® et du carroyage de la population fournie par l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) (cf. section 2.3.2).

À l'échelle locale (1 : 10 000 – 1 : 5 000), les primitives issues du RGE® (IGN) sont utilisées (l – Tableau 2.4). Les attributs sont définis à partir de la BD TOPO (nombre d'étages calculés à partir de la hauteur – *cf.* section 2.3.2) et la date de construction à partir des bases de données CETE (Centre d'étude technique de l'équipement de Rouen qui correspond aujourd'hui au CEREMA). Le critère type est défini à l'échelle large. L'état de dégradation du bâtiment ainsi que les matériaux de construction sont issus de photo-interprétation et d'observation de terrain pour quelques bâtiments. Une base de données notariale est également utilisée pour estimer le coût des bâtiments.

Les bases de données sélectionnées possèdent une nomenclature et des formats qui leurs sont propres. Afin d'être traduit sous la forme d'éléments exposés et de critères, une harmonisation de ces bases de données géographiques au sein d'un seul même espace de stockage d'information (cube de données multidimensionnel, e.g. *data warehouse*) (Vassiliadis *et al.*, 2002 ; Astriani et Trisminingsih, 2016) est indispensable. Les conditions d'intégration et d'harmonisation des données sont maintenant présentées.

Tableau 2.4 Sources et données utilisées pour la caractérisation des éléments exposés à l'échelle moyenne (M), large (L) et locale (l) (Graff *et al.*,2019b)

Couverture	Base de données	Données fournie	MAJ*	M	L	l
Globale	Open Street Map (OSM)	1. Bâtiment (surface, fonction, type, nom)	2018	●	●	●
		2. Usage des sols (surface, type, nom)	2018	●	●	●
		3. Zone naturelle (surface, type, nom)	2018	●		
		4. Zone d'activité (surface, type, nom)	2018	●	●	●
		5. Réseau (type, nom)	2018	●	●	
Nationale (France)	IGN[1] (BD TOPO®)	1. Réseau de transport (surface, type, état, etc.)	2017	●	●	
		2. Réseau d'énergie (type, tension, operateur)	2017	●	●	
		3. Zone naturelle (surface, type)	2017	●		
		4. Bâtiment (surface, hauteur, fonction, type)	2017	●	●	●
		5. Usage des sols (surface, fonction)	2017	●	●	
	CdL[2]	1. Zone protégée (surface, nom)	2011	●		
		2. Occupation des sols (type)	2011	●		
	RPG[3]	1. Parcelles agricoles (surface, type)	[2016]	●		
	INSEE[4]	1. Carroyage 200*200 m (population)	2010		●	
	INPN[5]	1. Zone protégée (surface, type, nom)	2017	●		
	Notaire/INSEE	1. Valeur foncière (valeur en €)	2018			●
Régionale	CETE[6]	1. Bâtiment (surface, date)	2011			●
	MOS Normandy[7]	1. Usage des sols (surface, type, fonction)	2009	●	●	
Locale	PLU/PLUi[8]	1. Usage des sols (surface, fonction)	[2007–2018]	●	●	
	Données de terrain et photo-interprétation	Bâtiment (matériaux de construction, état)	2018			●

* Dernières mise à jour des bases de données, [1]IGN (Institut national de l'information géographique et forestière); [2]CdL (Conservatoire du littoral); [3]RPG (Référentiel parcellaire graphique); [4]INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques); [5]INPN (Inventaire national du patrimoine naturel); [6]CETE (Centre d'études technique de l'équipement); [7]MOS Normandie (Mode d'occupation des sols de Normandie); [8]PLU/PLUi (Plan local d'urbanisme communal ou intercommunal).

2.3.2. Intégration et harmonisation des données sur une base de modèle ETL

L'intégration et l'harmonisation de multiples bases de données géographique au sein d'un cube de données multidimensionnel reposent fondamentalement sur les modèles de processus ETL (*Extraction Transformation Loading*) également appelé « *datapumping* » (Ponniah, 2001 ; Vassiliadis *et al.*, 2002 ; Astriani et Trisminingsih, 2016 ; Bouadi *et al.*, 2017 ; Silva *et al.*, 2017). Dans ce cas, l'objectif des modèles de processus ETL développés est de caractériser les éléments exposés en combinant l'ensemble des primitives géographiques et des caractéristiques attributaires au sein d'un espace de stockage commun (au format .gdb) à des échelles spatiales moyenne (modèle « MSA »), large et locale (modèle « LSA »).

La constitution de ces modèles nécessite la présentation du principe de fonctionnement global des modèles de processus ETL (section 2.3.2.1), l'élaboration d'un modèle à l'échelle moyenne « MSA » (*Medium Scale Analysis*) (section 2.3.2.2) et l'élaboration d'un modèle à échelle large et locale « LSA » (*Large and local Scale Analysis*) (section 2.3.2.3).

2.3.2.1. Principe de fonctionnement des modèles ETL

Les modèles de processus ETL (*datapumping*) reposent sur une technologie intergiciel (*i.e.* un réseau d'échanges d'informations entre différentes applications et plateformes de données). Ce réseau permet la synchronisation d'une source de données (*big data* lorsque les sources sont massives et en temps réel) vers un cube de données multidimensionnel (Vassiliadis *et al.*, 2002). Ce cube est un espace virtuel composé de *n* dimensions (Zhao *et al.*, 2011). Dans le cadre de données géographiques, les dimensions utilisées sont l'espace (subdivisé en communes, échelles spatiales, région, etc.) et le temps (subdivisé en année, décennies, etc.). Ce cube de données se présente sous la forme d'entrepôt de données (extension *Geographical DataBase* .gdb). Pour parvenir à cette harmonisation des bases de données au sein d'un même espace de stockage, des outils de combinaison, de constitution (ou de conversion) et d'extraction ont été développés sous différents langages (Python, C++, R, JavaScript, etc.) et sous différentes plateformes (ArcGIS, Qgis, Mapinfo, etc.) (Astriani et Trisminingsih, 2016).

Le modèle de processus ETL repose sur une analyse préalable des bases de données et sources de données (cf. section 2.3.1), la conception d'un cube de données multidimensionnel (GDB), la mise en place des outils d'extraction et de transformation des données, le transfert à l'espace de stockage et à la vérification des données intégrées et harmonisées (Figure 2.7).

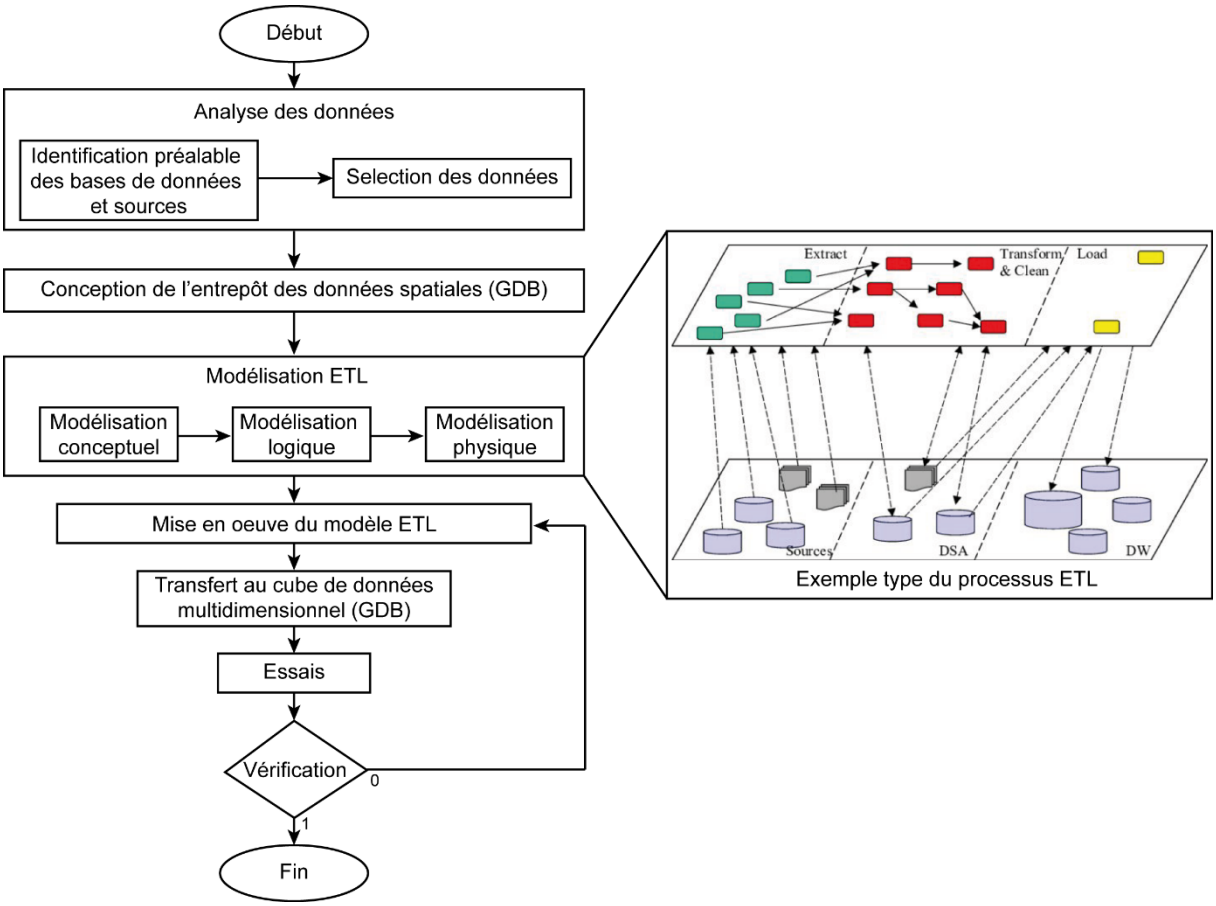


Figure 2.7 : Environnement d'un modèle de processus ETL (adapté de Vassiliadis *et al.*, 2002)

Les avantages d'une modélisation ETL sont liés à la structure du réseau d'extraction et de transformation des données, rapide d'exécution et nécessitant peu d'espace mémoire. Une fois en place et correctement paramétré, le processus est réutilisable à volonté et permet de mettre

à jour régulièrement les données harmonisées dans l'espace de stockage. Cependant, le processus de transformation nécessite l'adaptation du langage (nomenclature dans le cas de données géographiques) de chaque source de données vers l'espace de stockage terminal (Biljecki *et al.*, 2018 ; Hanus *et al.*, 2018 ; Yılmaz and Canıberk, 2018).

Le processus d'extraction, de transformation et de transfert (*pre-processing*, *input*, *processing*, *output*) a été réalisé sur les 20 bases de données géographiques identifiées et triées (Tableau 2.4). Deux modèles ont été développés : (1) à l'échelle moyenne (modèle MSA) et (2) à l'échelle large et locale (modèle LSA). Pour chacun des modèles, la première étape (*pre-processing*) consiste à définir l'emprise géographique du site d'étude voulu (coordonnées X et Y). Les bases de données sont alors à adapter selon le site d'étude puis sont intégrées dans le modèle (*input data*). La phase de transformation du modèle (*processing*) intègre l'ensemble des outils d'extraction, de combinaison et de transformation des données. Deux possibilités sont envisageables : (1) les règles de transformation et d'harmonisation sont internes au modèle, (2) les règles d'harmonisation sont établies en amont (*pre-processing*) et sont appliquées durant la phase de *processing*.

Plus le nombre de sources et de bases de données à intégrer est important, plus le nombre de règles d'harmonisation se complexifie. L'établissement de ces règles au sein même de la phase de *processing* peut alors engendrer des erreurs. Dans ce cas, leurs constitutions en amont du processus sont préférables. La phase de nettoyage est la phase la plus longue et la plus importante du modèle d'intégration. Cette étape repère les superpositions éventuelles, les anomalies à la fin du processus et la coexistence de valeurs attributaires (étape de vérification – Figure 2.7). Une fois l'information vérifiée et nettoyée, les données sont transférées vers la zone de stockage terminale (DW – *Data Warehouse*).

2.3.2.2. Élaboration du modèle d'harmonisation à échelle moyenne (MSA)

Le modèle MSA (*Medium Scale Analysis*) intègre et harmonise 13 bases de données géographiques provenant de sept sources d'information différentes (*input data*) (Figure 2.8). Pour des raisons de simplification et d'optimisation du processus, les règles d'harmonisation ont été externalisées (*standardization file.txt*) en phase de prétraitement (*pre-processing*). Pour *les zones bâties*, la logique est de simplifier les primitives et les valeurs attributaires. Après une première phase d'intégration (*spatial join*) permettant de renseigner les « bâtiments indifférenciés » de la BD TOPO® avec les données attributaires OSM®, une phase successive de standardisation (fichier externalisé), de nettoyage et d'érosion-dilatation permet de passer des bâtiments à des surfaces bâties (*upscaling*). Pour *les réseaux de transport et d'énergie*, l'attribut « largeur » (BD TOPO®) est utilisé pour modifier la primitive (ligne vers polygone) et simplifie la typologie pour une échelle spatiale moyenne.

Les *zones urbaines* ainsi que *les zones agricoles et naturelles* sont les éléments exposés nécessitant le plus de règles d'harmonisation. Six bases de données géographiques ont été utilisées pour la définition des zones urbaines (provenant de quatre sources) et quatre bases de données pour la définition des zones agricoles et naturelles (provenant de trois sources) pour plus d'une centaine de règles d'harmonisation. En cas d'ajout de nouvelles données, de nouvelles règles doivent être ajoutées pour que la zone de stockage puisse assimiler cette nouvelle typologie. Pour les zones agricoles, une règle d'intersection est comprise dans la phase d'intégration afin de considérer les parcelles agricoles (RPG) et l'extension spatiale maximale prévue pour les zones agricoles dans les documents d'urbanisme (PLU). L'opération est similaire pour les zones protégées et naturelles.

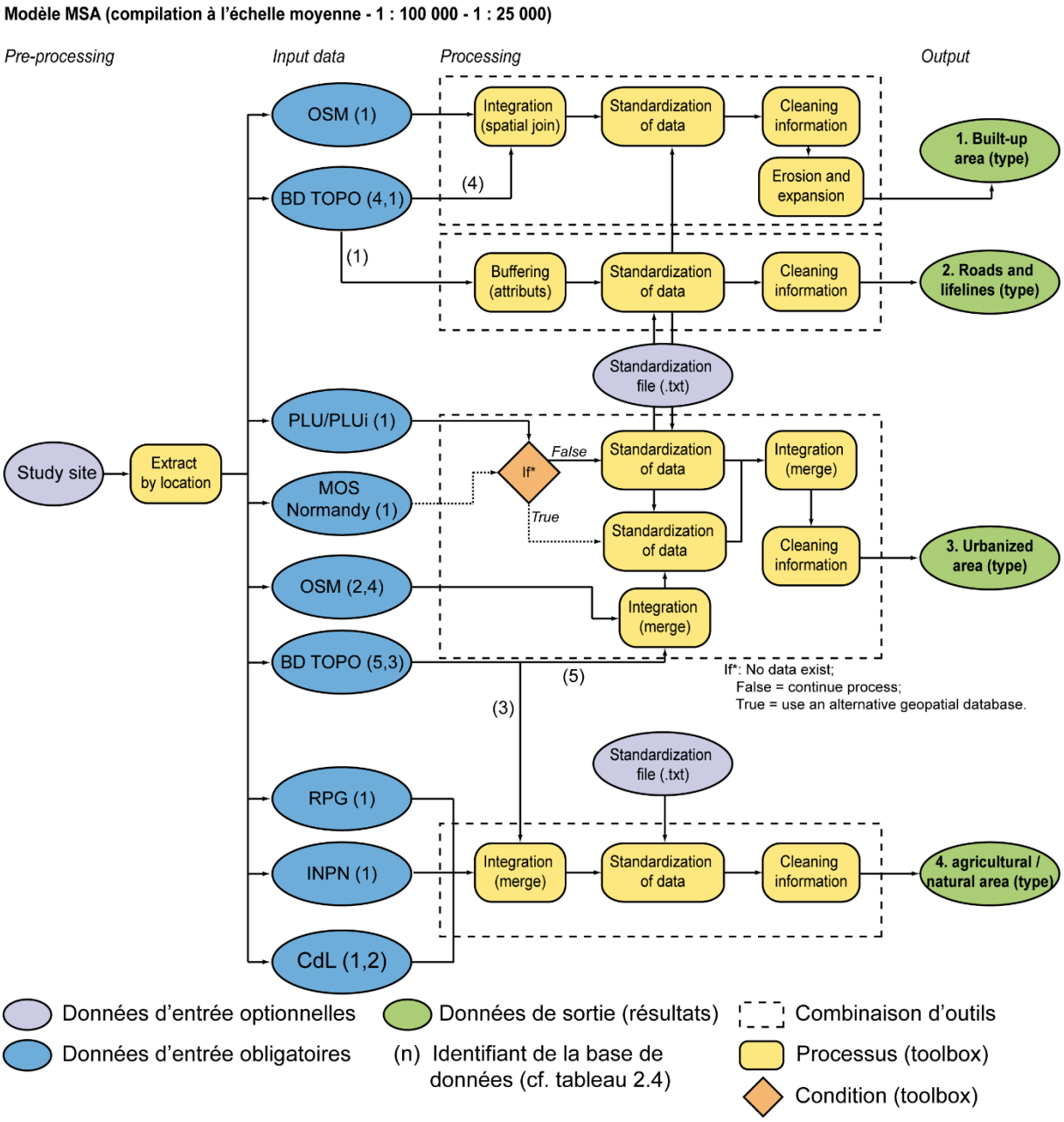


Figure 2.8 : Modèle d'intégration et d'harmonisation « MSA » réalisé par *visual scripting* (sous *model builder* dans un environnement SIG) (Graff *et al.*, 2019b)

Chaque règle fonctionne par condition : par exemple, une zone pavillonnaire nommée « ZUa » dans un PLU doit être renommé « *Zone pavillonnaire* » dans la zone de stockage des données. Pour chaque attribut identifié dans une base de données, une règle d'harmonisation doit nécessairement être appliquée. L'automatisation des règles d'harmonisation est possible en faisant appel à du *Machine Learning* ou des réseaux neuronaux (Miller et Goodchild, 2015 ; Bona *et al.*, 2017 ; Yin *et al.*, 2017).

2.3.2.3. Élaboration du modèle d'harmonisation à échelle large et locale (LSA)

Le modèle d'intégration à échelle large et locale (modèle « LSA » - *Large and local Scale Analysis*) utilise neuf bases de données provenant de huit sources d'information différentes. La résolution native des primitives du RGE® a été conservée pour les bâtiments. Pour les réseaux de transport, la primitive ligne est convertie en polygone à partir de la valeur attributaire

« largeur » (*buffer*) fournie également dans le RGE® (Figure 2.9). Pour *les réseaux d'énergie*, les primitives « points » et « lignes » sont convertis en surface en considérant une valeur moyenne en largeur et longueur d'un pylône de 5 m et en ajoutant une valeur moyenne Z (altitude) aux lignes électriques de 50 m (Directive 98/34/CE du parlement européen sur les règles relatives aux services de la société de l'information). A l'échelle locale, les primitives utilisées pour la caractérisation des bâtiments sont également issues du RGE®.

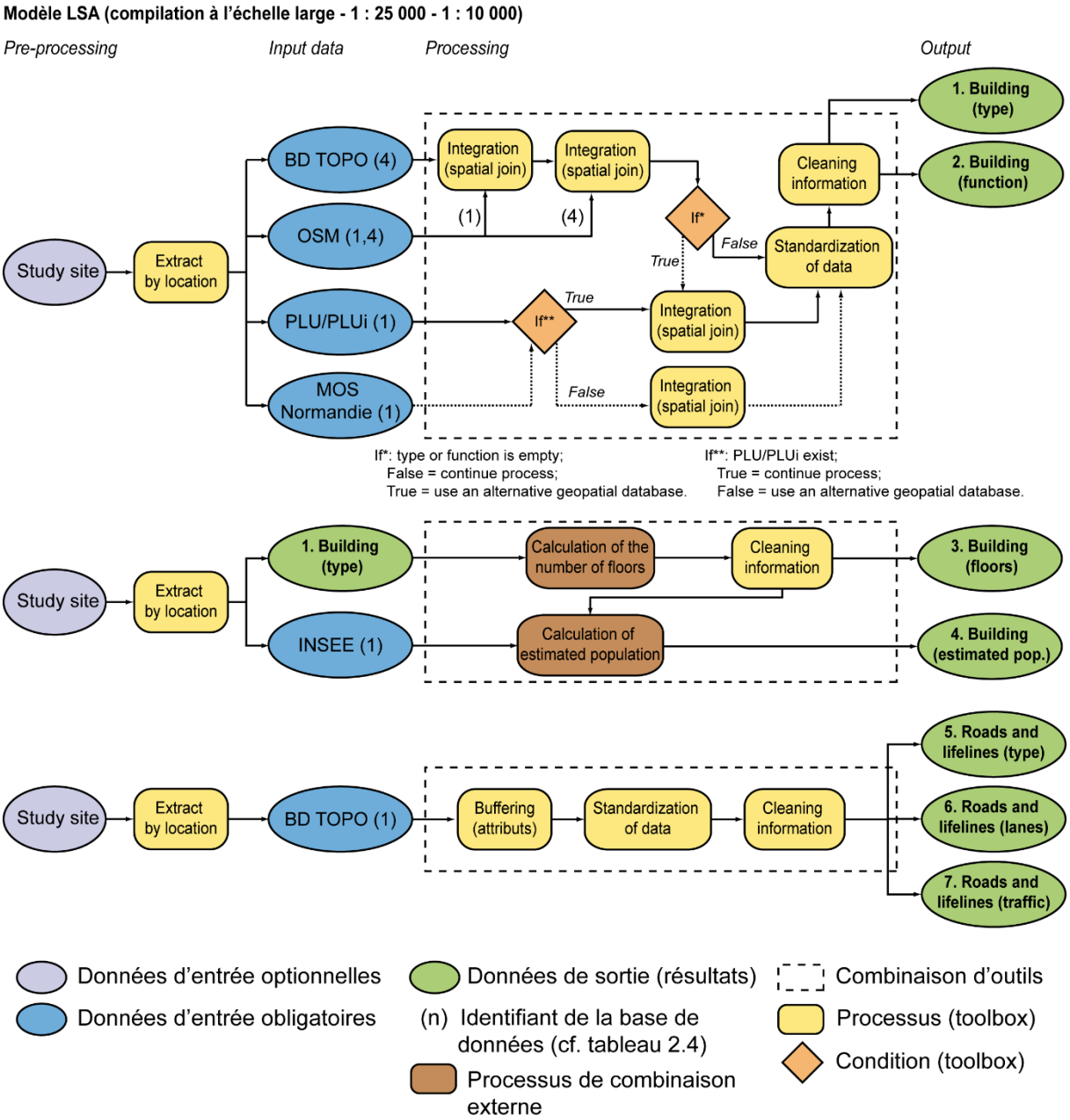


Figure 2.9 : Modèle d'intégration et d'harmonisation « LSA » réalisé par *visual scripting* (sous *model builder*) (Graff *et al.*, 2019b)

Cinq bases de données issues de quatre sources sont utilisées pour renseigner le type et la fonction des bâtiments. Ce nombre important de bases pour ces deux critères vient du fait qu'environ 70 - 80 % des bâtiments des sites d'études possèdent une primitive, mais sont renseignés en tant que « bâtiment indifférencié ». La base de données OSM®, les PLU communaux et intercommunaux (avec la base de données « MOS Normandie » en cas d'absence de documents d'urbanisme) renseignent ce manque de précision attributaire pour

l'ensemble des bâtiments. Depuis le 24 avril 2019, la base de données DVF (Demande de valeur foncière – https://app.dvf.etalab.gouv.fr/) peut être utilisée pour la mise à jour, en lieu et place ou en complément des documents d'urbanisme et de la base de données « MOS Normandie ». Cette base de données n'est pas encore développée et disponible sur l'ensemble du territoire français. Le RGE® fournit une information précise sur le type, le nombre de voies et le trafic (fréquentation) des réseaux de transport et un faible degré de transformation est requis pour ces attributs dans le modèle LSA. La base de données CETE fournit la date de construction (D. construction - Figure 2.9) pour chacun des bâtiments présents sur les sites d'étude. Par contre, le nombre d'étages et le nombre estimé de personnes par bâtiment ont nécessité des systèmes de combinaison complémentaires au sein du modèle d'harmonisation (ce qui fait l'objet de la section suivante).

2.3.3. Système de combinaisons des données et essai d'automatisation des modèles MSA et LSA

Fondamentalement, les modèles ETL ne sont destinés qu'à un chargement, à une conversion puis à un transfert de l'information. Cependant, dans le cas de données géographiques, des étapes intermédiaires peuvent être ajoutées afin de produire de nouvelles formes de données à partir des données harmonisées (Figure 2.9). Ces étapes intermédiaires sont définies comme des systèmes de combinaisons et s'opèrent au sein même de la phase *processing* des modèles. La mise en place des systèmes de combinaisons est rendue possible par le paramétrage de « *précondition* » au sein de la phase de programmation ou de *visual scripting* (Figure 2.10). Cet outil déclenche les systèmes de combinaisons dans un ordre spécifique lorsque les informations sont disponibles.

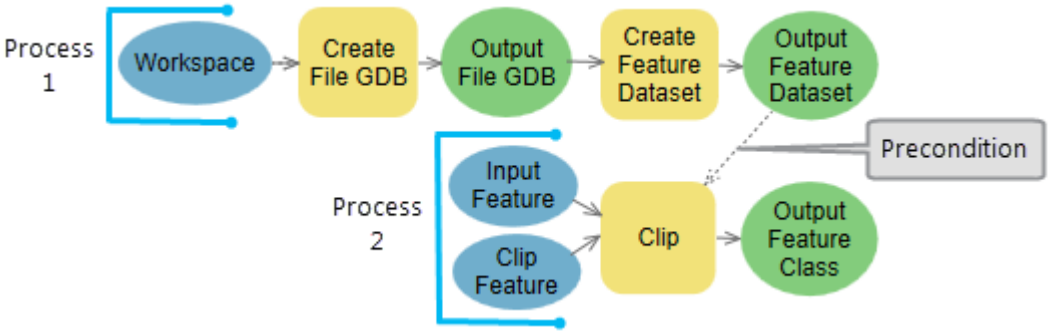


Figure 2.10 : Fonctionnement de la « précondition » des processus (toolbox) dans un environnement SIG (schéma issu d'ESRI, 2019 – https://pro.arcgis.com/)

Ainsi, nous présentons ci-après un système de combinaisons intégré au sein du modèle LSA pour la détermination du critère « nombre d'étages » et « population estimée » (section 2.3.3.1) et des essais de développement pour automatiser en partie le processus d'harmonisation et simplifier sont utilisation par la réalisation de « toolbox » utilisable sous différentes plateformes SIG (section 2.3.3.2).

2.3.3.1. Détermination du critère « nombre d'étages » et « population estimée »

La population estimée par bâtiment se calcule à partir des critères structuraux des bâtiments d'habitation (nombre d'étages, emprise au sol et espace habitable) ainsi qu'à partir des données de population renseignée par l'INSEE (carroyage de 200 × 200 m comprenant la valeur absolue du nombre d'habitants par maille). Le RGE® renseigne la hauteur des bâtiments (précision > 1 m) ainsi que l'emprise au sol. Certains auteurs utilisent une unique valeur pour identifier le nombre d'étages par bâtiment (Zhao *et al.*, 2015 ; Martani *et al.*, 2018). Cependant, sur les trois

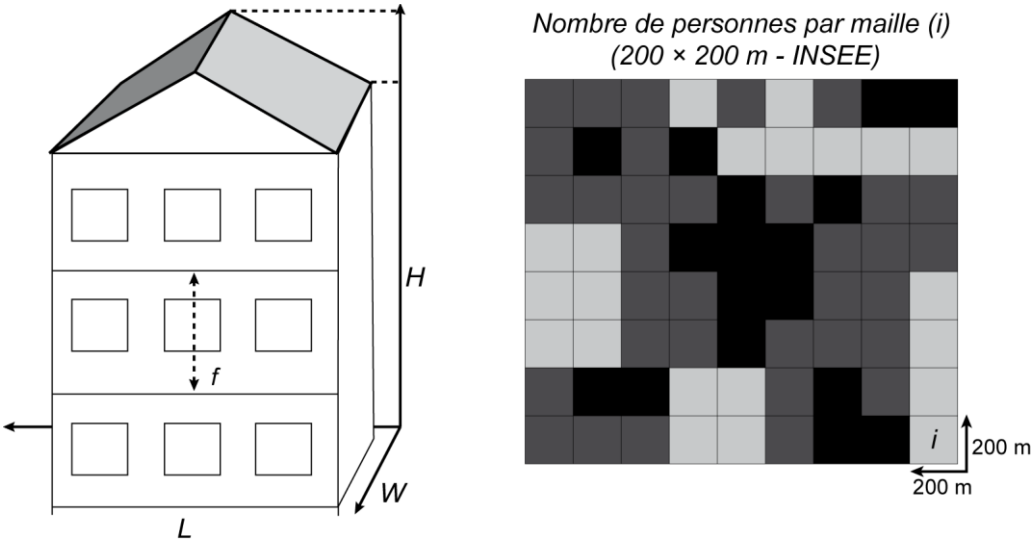
sites d'étude, la hauteur peut fortement varier entre les différents types de bâtiment. Ainsi, les standards définis par le *Council on Tall Building and Urban Habitat* (*CTBUH*) ont été utilisés pour définir une hauteur d'étage moyen par type de bâtiment (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 Standards européens utilisés pour définir la hauteur moyenne par type de bâtiment

Standards européens	*f* (m)
Maison	3.0
Appartement	3.1
Bureau	3.9
Utilisation mixte	3.5
Autre	3.1

CTBUH. 2015. Height Calculator. http://www.ctbuh.org/

Le nombre d'étages (*Nf*) est calculé en divisant la hauteur maximum de chacun des bâtiments par les niveaux d'étages moyens par type de bâtiment (Figure 2.11). L'espace habitable (*Ls*) est calculé ensuite pour chaque bâtiment d'habitation (résidentiel) en multipliant la surface au sol (*LW* – largeur × longueur) avec le nombre d'étages (Azad *et al.*, 2018). La surface habitable est ensuite combinée avec le recensement de la population (résidentielle) dans des mailles de 200 × 200 m (*i*) produites par l'INSEE (2010).



Nombre d'étages (*Nf*) :

$$Nf = \frac{H}{f} \qquad (1)$$

Espace habitable (*Ls*) :

$$Ls = (LW)\ Nf \qquad (2)$$

Espace habitable total par maille ($\Sigma_{Ls}i$) :

$$\Sigma_{Ls}i = i \bowtie Ls \qquad (3)$$

Où l'opération de jointure = One to one,
et match option = Intersect et $\bowtie$ *= spatial join.*

Population estimée (Ep) :

$$Ep = Ls \bowtie i \left(\frac{Ls}{\Sigma_{Ls}i}\right) \qquad (4)$$

Où l'opération de jointure = One to one
et match option = Intersect.

Figure 2.11 : Système de combinaison des données « bâti » (IGN RGE®) et population par maille (INSEE) au sein du modèle « LSA » (Graff *et al.*, 2019b)

Le critère « population estimée » (*Ep – Estimated population*) a été déterminé en quatre étapes successives à partir d'un modèle que nous avons élaboré sous SIG. Le but du modèle est d'intégrer dans chacun des bâtiments d'habitation, le recensement de la population réalisé par l'INSEE (2009) pour des mailles de 200*200 m. L'intégration de la population dans ces bâtiments nécessite dans un premier temps de connaître (Figure 2.11) :

(1) Le nombre d'étages (*Nf*) en rapport avec la hauteur totale (*H - Heigh*) d'un bâtiment déterminé par les standards européens (*f* – Tableau 2.5) ;

(2) La surface habitable par bâtiment (*Ls – Living space*) en multipliant la surface au sol (*LW – Lenght and Width*) par le nombre d'étages (*Nf – Number of floor*) ;

Une fois la surface habitable connue par bâtiment (*Ls*), nous avons voulu injecter cette information dans le maillage de 200 par 200 m grâce à un outil de jointure spatiale. Cette injection permet de calculer la surface totale habitable au sein de chacune des mailles. Pour cela :

(3) Nous avons utilisé un outil jointure spatiale du bâtiment vers les mailles de l'INSEE avec l'outil « *spatial join* » ($\Sigma_{Ls}i$) ;

(4) Une fois la somme des surfaces habitables totales connue au sein de chacune des mailles ($\Sigma_{Ls}i$), nous avons fait une nouvelle jointure spatiale des mailles vers les bâtiments d'habitation.

Pour chacun des bâtiments, nous disposions donc de trois informations : la surface habitable du bâtiment (*Ls*), la surface totale habitable au sein de chaque maille ($\Sigma_{Ls}i$) et le recensement total de la population dans chacune des mailles (*i*). La population estimée par bâtiment (*Ep*) a été calculée en faisant le produit du nombre total de personnes par maille (*i*) et de la surface habitable par bâtiment (*Ls*), divisé par la surface habitable par maille ($\Sigma_{Ls}i$).

2.3.3.2. Essai de développement de Toolbox permettant l'automatisation partielle du processus d'harmonisation

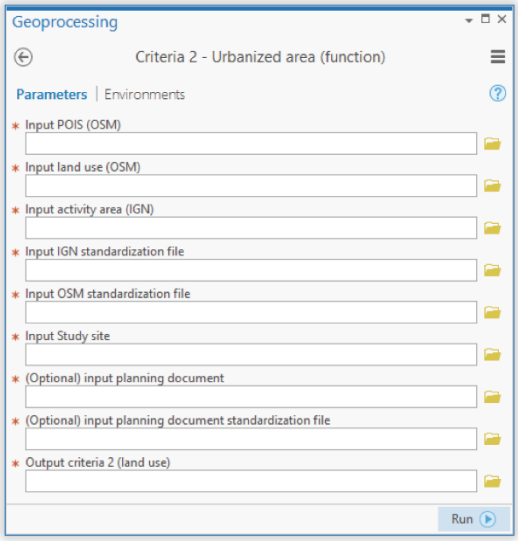
Les modèles MSA et LSA initialement élaborés requièrent une exécution manuelle des différents outils et une vérification systématique à chacune des étapes du processus. Dans une perspective des mises à jour des données et d'extrapolation de la méthode, à différents sites et différents contextes d'étude, une simplification de l'interface des modèles ETL peut se faire par l'utilisation de toolbox sous différentes plateformes SIG (Amine *et al.*, 2016 ; Andersen *et al.*, 2018 ; Knap *et al.*, 2018 ; Bialke *et al.*, 2018).

Les scripts utilisés sont prévus avec les outils de la bibliothèque ArcPy (ESRI). Des essais de développement des scripts (zones bâties, surfaces en routes et zones urbaines) ont été réalisés pour le modèle MSA car les outils impliqués restent relativement simples à intégrer dans un langage Python. De plus, la gestion des erreurs et le processus de vérification lors de l'extraction et l'harmonisation des données est plus facile et demande moins de ressource (Figure 2.12).

(1) Automatisation partielle du modèle MSA

Extrait du script « MSA » (modèle à l'échelle moyenne) développé dans un environnement python

(2) Diffusion sous forme de Toolbox



Exemple de diffusion du script sous forme de toolbox (Modèle « MSA » --> détermination des zones urbaines)

(1) Développement du script MSA (zones urbaines) dans un environnement Python. (2) Application du script à la plateforme ArcGIS PRO.

Figure 2.12 : Réalisation d'une toolbox pour caractériser les zones urbaines à une échelle d'analyse moyenne (dans le cadre du modèle MSA)

Plus le nombre de bases de données et d'outils à ajouter est important, plus la gestion des erreurs dans le script se complexifie notamment lorsque les objets sont initialement non reconnus sur les sites d'étude. L'externalisation des outils d'harmonisation (utilisation d'un fichier .txt complémentaire) est donc privilégiée pour les deux modèles (MSA et LSA). L'automatisation du modèle LSA grâce à des scripts Pyhton nécessite davantage de développement et n'a pu être aboutie et testée dans le cadre de ce travail de thèse (le modèle a uniquement été réalisé par *visual scripting*).

2.3.4. Conclusion

Pour différentes échelles spatiales, les éléments exposés (primitives géométriques et valeurs attributaires) sont caractérisés à partir d'un inventaire des bases de données présentes sur les sites et d'un contrôle qualité. En quelques années, le nombre de bases de données a augmenté radicalement avec une précision d'ordre métrique sur la spatialisation des objets. Pour considérer l'ensemble de ces bases au sein même d'un même espace de stockage (cube de données multidimensionnel), des modèles de processus ETL (*Extraction Transformation Loading*) permettent le transfert et l'harmonisation de l'ensemble des bases de données identifiées.

Basés sur le fonctionnement d'un modèle de processus ETL, les modèles MSA et LSA ont été ainsi développés afin de considérer l'ensemble des données géographiques disponibles sur les trois sites d'étude et de les harmoniser dans une *geographical database* (.gdb) à trois échelles spatiales (moyenne, large et locale). Comme pour l'utilisation de software type Google Maps® ou OpenStreetMap® ou Géoportail (IGN), la connexion entre les différentes couches vectorielles s'opère en affichant les couches entre certaines échelles : (1) échelle moyenne : propriété d'affichage supérieur au 1 : 25 000 ; (2) échelle large : propriété d'affichage entre le 1 : 25 000 et le 1 : 10 000 ; (3) échelle locale : propriété d'affichage inférieure à 1 : 10 000.

2.4. Résultats du processus d'intégration et d'harmonisation des données

La caractérisation des éléments exposés nécessite un nombre important de données récoltées soit par le terrain soit par l'utilisation de multiples bases de données lorsque celle-ci est disponible. L'extraction, l'harmonisation et le transfert de ces bases de données ont été réalisés sur la base d'une modélisation de processus ETL. Deux modèles ont été ainsi développés pour considérer les éléments exposés aux échelles spatiales moyenne (modèle MSA), large et locale (modèle LSA). Ces modèles ont été élaborés, testés et analysés initialement sur le site d'étude n°1. Une fois, le paramétrage réussi, les modèles MSA et LSA ont été appliqués aux sites d'étude n°2 et n°3 à une échelle moyenne et large afin d'évaluer l'efficacité de la transposition de ces modèles à des sites adjacents littoraux et vérifier les calibrations requises au niveau des règles d'harmonisation en cas de transposition durant le processus d'intégration des données géographiques.

Les résultats obtenus avec les modèles d'intégration et d'harmonisation LSA et MSA comprenant les calculs des marges d'erreur sont présentés et analysés dans la section 2.4.1 pour les trois échelles spatiales retenues. Puis, la section 2.4.2 présentent les intérêts et limites d'une approche multiscalaire dans la caractérisation des éléments exposés par modélisation de processus ETL.

2.4.1. Analyse des résultats des modèles MSA et LSA

Les résultats obtenus par les modèles MSA et LSA peuvent servir pour différentes applications en termes d'évaluation des conséquences potentielles liées aux différents éléments exposés ainsi caractérisés (Chapitre 3), de cartographie à partir de différentes représentations 2D, 2,5D et 3D, d'analyses statistiques entre différents critères ou éléments exposés et d'analyse spatiale plus généralement. Une représentation cartographique classique (2D) a été privilégiée à échelle moyenne. À une échelle large et locale, le mode de représentation 3D a été utilisé (De Cambray, 1993 ; Geiger *et al.*, 2015).

2.4.1.1. Résultats et calculs de la marge d'erreur du modèle MSA à l'échelle moyenne

Le modèle MSA (*Medium Scale Analysis*) intègre et harmonise 13 bases de données pour couvrir les 484 km² des trois sites d'étude. Après un processus d'érosion-dilatation des primitives géométriques, les zones bâties ont été classées finalement en seulement huit catégories et représentent 1,7 % (site n°1) à 2,7 % (site 2) de la surface totale des sites. Sept catégories ont été utilisées pour les réseaux (transport et d'énergie) et couvrent 1,8 % à 2,3 % de la surface totale. La proportion moyenne des zones urbaines varie entre 12 % (site n°3) à 20 % (site n°1) et elles ont été définies en 12 catégories. Les surfaces agricoles et naturelles comprennent entre 76 % (site n°1) et 82 % (site n°2) de la surface totale et ont été divisées en huit catégories (Figure 2.13).

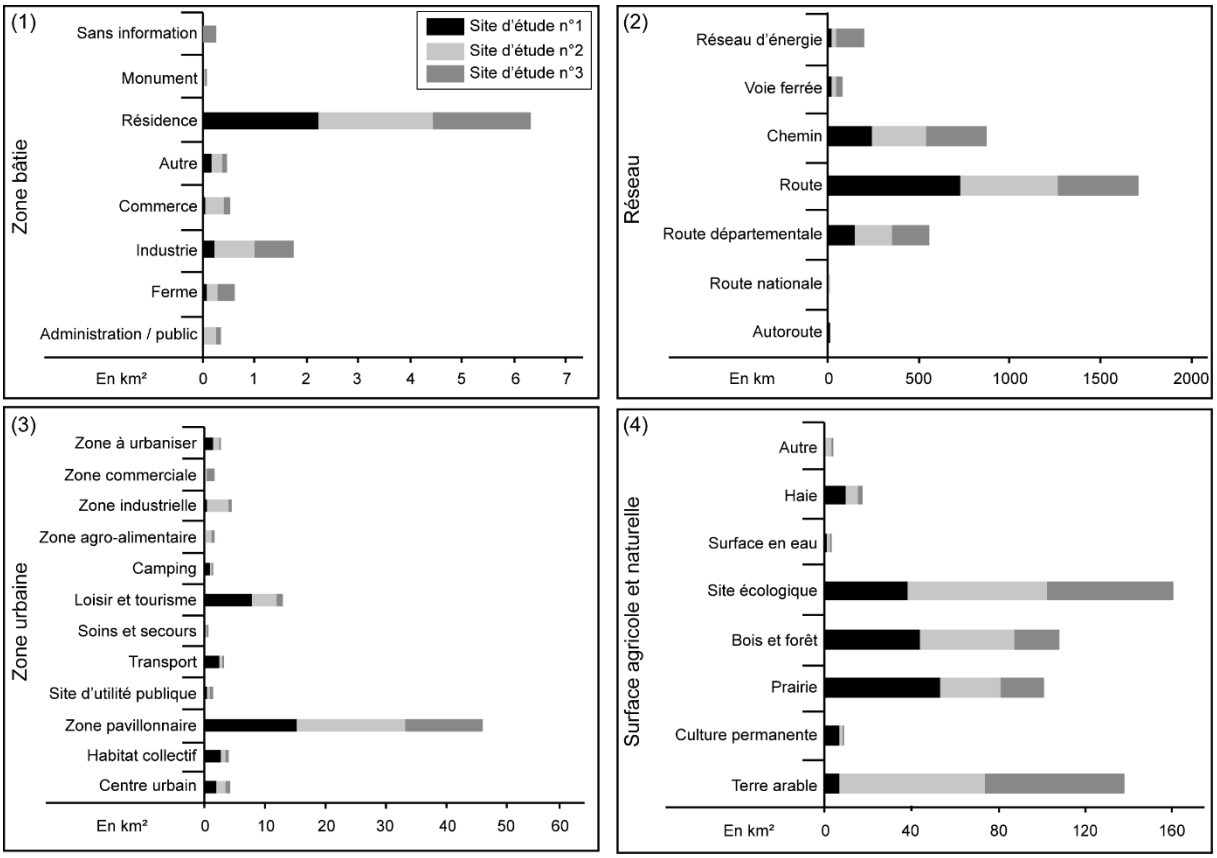


Figure 2.13 : Cumuls des surfaces et des linéaires des éléments exposés définis par le modèle MSA sur les trois sites d'étude (échelle d'analyse moyenne) (Graff *et al.*, 2019b)

L'utilisation d'une unique base de données s'est montrée insuffisante pour caractériser l'ensemble des éléments exposés. Aussi, pour les zones urbaines, les documents d'urbanisme (PLU/PLUi) ont pu fournir une information sur les types de zones résidentielles (pavillonnaire, collectif, mixte, etc.). Les zones urbaines représentent 36 % de l'information adéquate finale (Figure 2.14). Cependant, le couplage de la BD TOPO® (IGN) avec les bases de données OpenStreetMap® (VGI) a été essentiel pour compléter l'information sur la typologie de ces surfaces urbaines (*i.e.* zones administratives, d'industrie, de production agroalimentaire, de commerces, de centres de soins) et pour fournir 64 % de l'information manquante.

Comme cela a été précisé précédemment, les bases de données OpenStreetMap® sont particulièrement précises (type et fonction) dans les zones à haute densité ou fréquemment visitées (tourisme, loisir, commerces, etc.) en fournissant l'information sur la toponymie des zones d'activités. Cette identification a pu faciliter la détection des erreurs typologiques ainsi que la rectification des données durant la phase de nettoyage du modèle (e.g. une zone industrielle dans la BD TOPO qui était considérée en zone commerciale dans OpenStreetMap®).

Les différents types de parcelles agricoles et surfaces naturelles ont été déterminés dans un premier temps à partir des bases de données du RPG. Ces données ne couvraient pas l'ensemble des parcelles (renseignées par les agriculteurs) et ont été alors couplées aux documents d'urbanisme afin de considérer les limites juridiques des espaces agricoles. La combinaison de la BD TOPO®, de l'INPN et du CdL a fourni une information sur les types de surfaces naturelles (*i.e.* forêts, bois, haies, prairies naturelles, plages, etc.) et sur les zones d'intérêt écologiques juridiquement protégées (Figure 2.14).

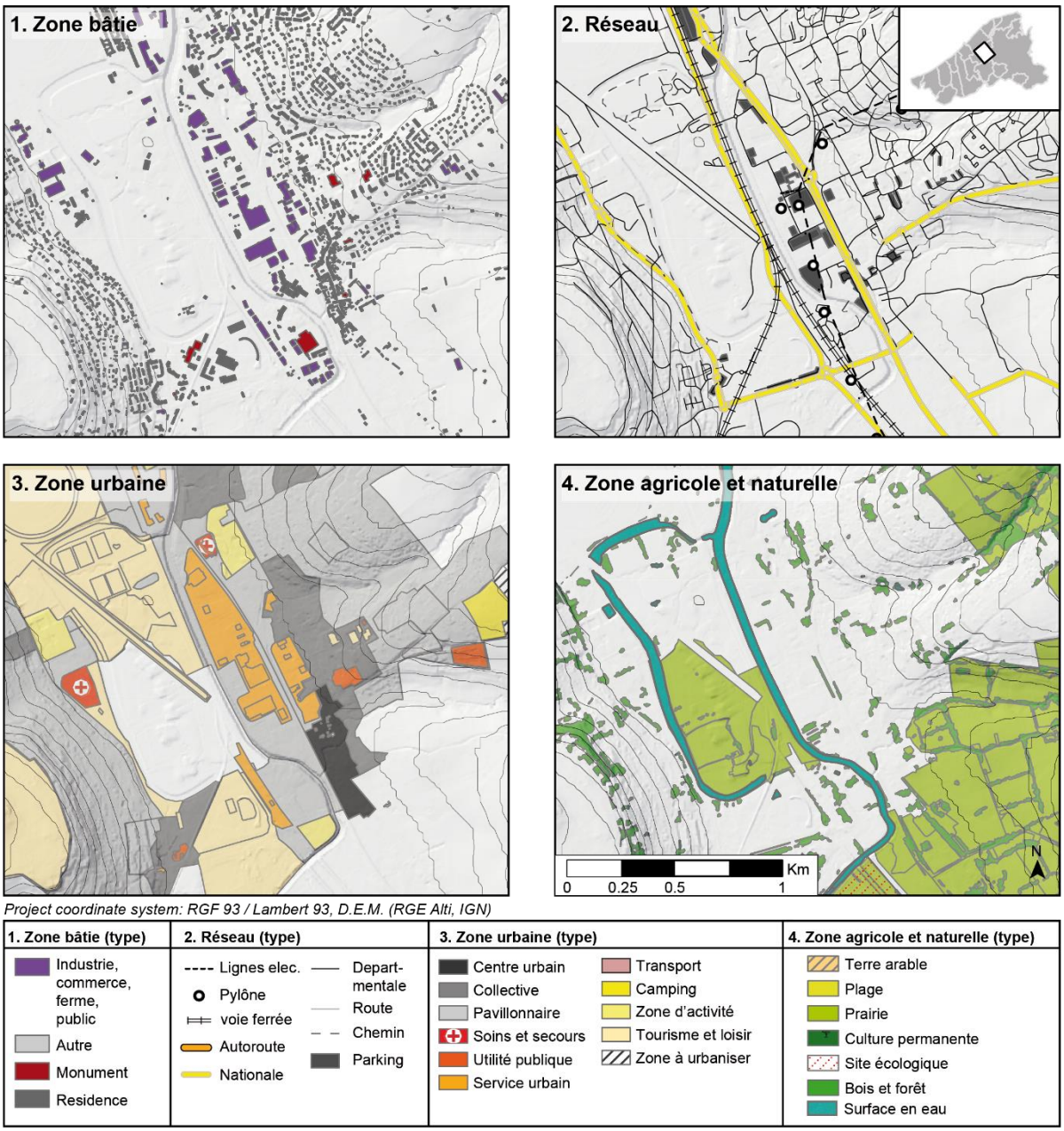


Figure 2.14 : Représentation spatiale des éléments exposés issus de l'harmonisation des bases de données par le modèle MSA (Graff *et al.*, 2019b)

La mise à jour des données à l'échelle moyenne est ainsi possible pour les zones bâties ainsi que pour les réseaux, car l'IGN fournit annuellement une mise à jour de ses bases de données. Les zones agricoles et surfaces naturelles ont des bases données mises à jour tous les quatre à six ans (RPG, INPN). Lorsque les communes ne sont pas soumises au règlement national de l'urbanisme, la mise à jour des PLU/PLUi n'est pas systématique et est variable d'une commune à une autre (art. L153-60 du code de l'urbanisme). Potentiellement, les documents d'urbanisme intègrent la réserve foncière (zone à urbaniser) à 15 ans selon les scénarios retenus ce qui permet d'avoir une idée des futurs changements d'utilisation et d'occupation des sols en utilisant des schémas non aléatoires (Johnson et Iizuka, 2016 ; Stehman *et al.*, 2018). Enfin, les bases de données *OpenStreetMap*® sont mises à jour quotidiennement.

La validation des données est basée sur la précision des attributs et s'opère sur (1) les zones bâties, (2) les réseaux de transport et d'énergie, (3) les zones urbaines et (4) les surfaces agricoles et naturelles. Cette vérification se base sur un tirage aléatoire des individus en considérant la formule de Cochran (2007) (5). Ainsi, sur plus de 41 000 attributs renseignés, 1 400 ont été tirés aléatoirement et vérifiés par photo-interprétation avec la *World Imagery* (ESRI) ou en utilisant *Google Street View* (Tableau 2.6).

$$(5)\ Formule\ de\ Cochran = \frac{Z^2pq}{e^2}$$

Où e est le nombre d'éléments (attributs), Z est un score avec un niveau de confiance à 95 %, p est la proportion estimée d'un attribut présent dans une population et q est 1- p.

Tableau 2.6 Validation des attributs à la suite de l'harmonisation des données à l'échelle moyenne avec une marge d'erreur de 5 % (Graff *et al.*, 2019b)

Éléments exposés	*Zone bâtie*	*Réseau (transport / énergie)*	*Zone urbaine*	*Zone agricole et naturelle*	*Total*
Nombre d'items	23 978	9 117	1 129	7 441	41 665
Taille échantillon	379	369	287	367	1 402
Validation	336	369	260	339	1 304
*Non identifiable**	25	0	12	0	37
Erreur	43	0	27	28	98
Validité	88,7%	100,0%	90,6%	92,4%	92,9%

Au regard des résultats obtenus, les zones bâties ont été caractérisées avec une précision variant entre 85 % et 90 % (principalement due au processus de dilatation et d'érosion des primitives afin d'augmenter le niveau de généralisation). Les réseaux de transport et d'énergie ont été caractérisés avec une précision de 100 % (tous les échantillons vérifiés correspondent à la réalité). Les zones urbaines ainsi que les surfaces agricoles et naturelles ont été caractérisées avec une précision supérieure à 90 %. Par conséquent, la marge d'erreur du processus d'harmonisation et de transfert à échelle moyenne (modèle MSA) est inférieure à 10 %. Ainsi, les résultats obtenus peuvent être utilisés pour différentes applications avec un degré de confiance très acceptable.

2.4.1.2. Résultats et calculs de la marge d'erreur du modèle LSA à l'échelle large

Rappelons que cette échelle large (1 : 25 000 – 1 : 10 000) porte sur la caractérisation des bâtiments et des réseaux de transport et d'énergie. Quatre critères sont utilisés pour les bâtiments : (1) le type, (2) la fonction, (3) le nombre d'étages et (4) la population estimée. Trois critères sont utilisés pour les réseaux : (1) le type, (2) le nombre de voies et (3) le trafic. Pour définir le type et la fonction des bâtiments, trois bases de données ont été utilisées (BD TOPO®, OSM® et les documents d'urbanisme). Le référentiel à grande échelle de l'IGN a été utilisé pour la définition des primitives géométriques des bâtiments et des routes.

La phase d'intégration des données du modèle LSA pour le type et la fonction s'est opérée en trois itérations (Tableau 2.7). Sur plus de 31 000 bâtiments identifiés (paramétrage sur le site n°1), le renseignement attributaire par la BD TOPO était de 5 % (le reste était caractérisé en « bâtiment indifférencié »). En intégrant les bases de données OSM®, le degré d'information apporté est passé à 30 % et concernait principalement les bâtiments d'activités (commerces, industrie, centre commercial, etc.) et de loisirs (musée, centre d'information, hôtel, etc.). Les documents d'urbanisme, couplés aux règles d'urbanisme de la loi Alur (n°2014-366 du 24 mars 2014) sur les surfaces minimums habitables, ont permis d'identifier les différents types de

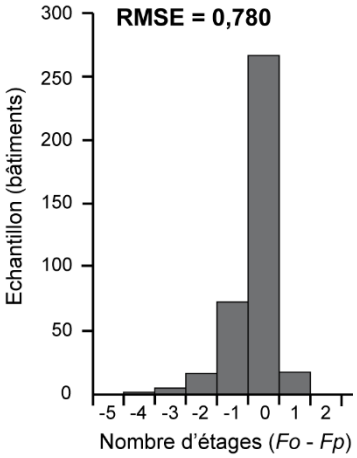
bâtiments d'habitation (pavillon, immeuble, etc.) et ainsi apporter une plus grande précision sur la typologie des résidences (individuelle, collective, mixte).

La procédure de nettoyage de la donnée a permis, dans un premier temps, de détecter des conflits entre deux informations différentes pour chaque élément exposé (outil : « *Find Conflicts* »). Ces conflits étaient essentiellement liés à des erreurs typologiques (e.g. dans un cas un bâtiment était référencé en tant que bâtiment industriel ; dans un autre cas, il est référencé en tant que bâtiment commercial). Une correction manuelle a été alors nécessaire après vérification de la redondance (sous *Google Street View®* ou par photo-interprétation) (Figure 2.15).

Tableau 2.7 Nombre de bâtiments par type et par fonction sur le site n°1 aux différentes phases d'intégration du modèle LSA (Graff *et al.*, 2019)

Critère 1 (type)	*It.1*	*It.2*	*It.3*	*Critère 2 (fonction)*	*It.1*	*It.2*	*It.3*
Maison	0	0	13 101	Résidentielle	0	0	19 630
Appartement	0	0	6 525	Commerciale	57	250	250
Bureau	0	126	126	Industrielle	985	1 009	1 009
Ferme	169	215	215	Agroalimentaire	169	215	215
Industrie	985	1 009	1 009	Administrative	26	72	72
Magasin	57	125	125	Education	68	68	68
Château	31	40	40	Soins	0	37	37
Église	37	66	66	Tourisme	0	219	219
Monument	27	27	27	Énergie	188	188	188
Station	2	2	2	Loisir	0	164	164
Entrepôt	0	3315	3 315	Transport	2	2	2
Tour	7	7	7	Garage, abri, etc.	0	9331	9331
Complexe	23	164	164	Religion	37	66	66
Abri/cabane	12	6 530	6 530	Sans information	29 719	19 630	0
Sans information	29 901	19 625	0				

It.1 est la première itération de la phase d'intégration du modèle LSA (données IGN), It.2 est la deuxième itération de la phase d'intégration (données OSM®), It.3 est la troisième itération de la phase d'intégration (données : PLU, PLUi, MOS Normandie).



$$(6)\ RMSE = \frac{\sqrt{\sum(Fo-Fp)^2}}{n}$$

Où *Fo* est le nombre d'étages observés, *Fp* est le nombre d'étages prédits par le modèle et *n* est la taille totale de l'échantillon

Figure 2.15 : Différences entre le nombre d'étages observés (*Fo*) et le nombre d'étages prédits (*Fp*) pour 381 bâtiments (Graff *et al.*, 2019b)

Le système de combinaison déterminant le nombre d'étages a été rélisé à partir de la hauteur des bâtiments fournie par l'IGN. Sur plus de 30 000 bâtiments, 5 426 bâtiments n'étaient pas renseignés (17 %). Sur les bâtiments restants, la marge d'erreur a été calculée grâce au RMSE

(*Root Mean Square Error*) en comparant les données prédites avec un échantillonnage aléatoire de 381 bâtiments. Avec une validité des données de 80 %, le modèle de calcul du nombre d'étages tendait à surestimer de 0,78 le nombre d'étages réel. Le modèle est donc efficace car il permet l'automatisation de la détermination du nombre d'étages sur plus de 30 000 bâtiments (site n°1) avec seulement un étage d'erreur pour 20 % des données.

Les nombres de personnes résidant dans des mailles de 200 × 200 m (INSEE, 2010) ont été redistribués dans les bâtiments résidentiels en fonction des surfaces habitables (loi Alur – 2014-366). Pour les réseaux de transport et d'énergie, les données du RGE® ont été essentiellement utilisées (Figure 2.16).

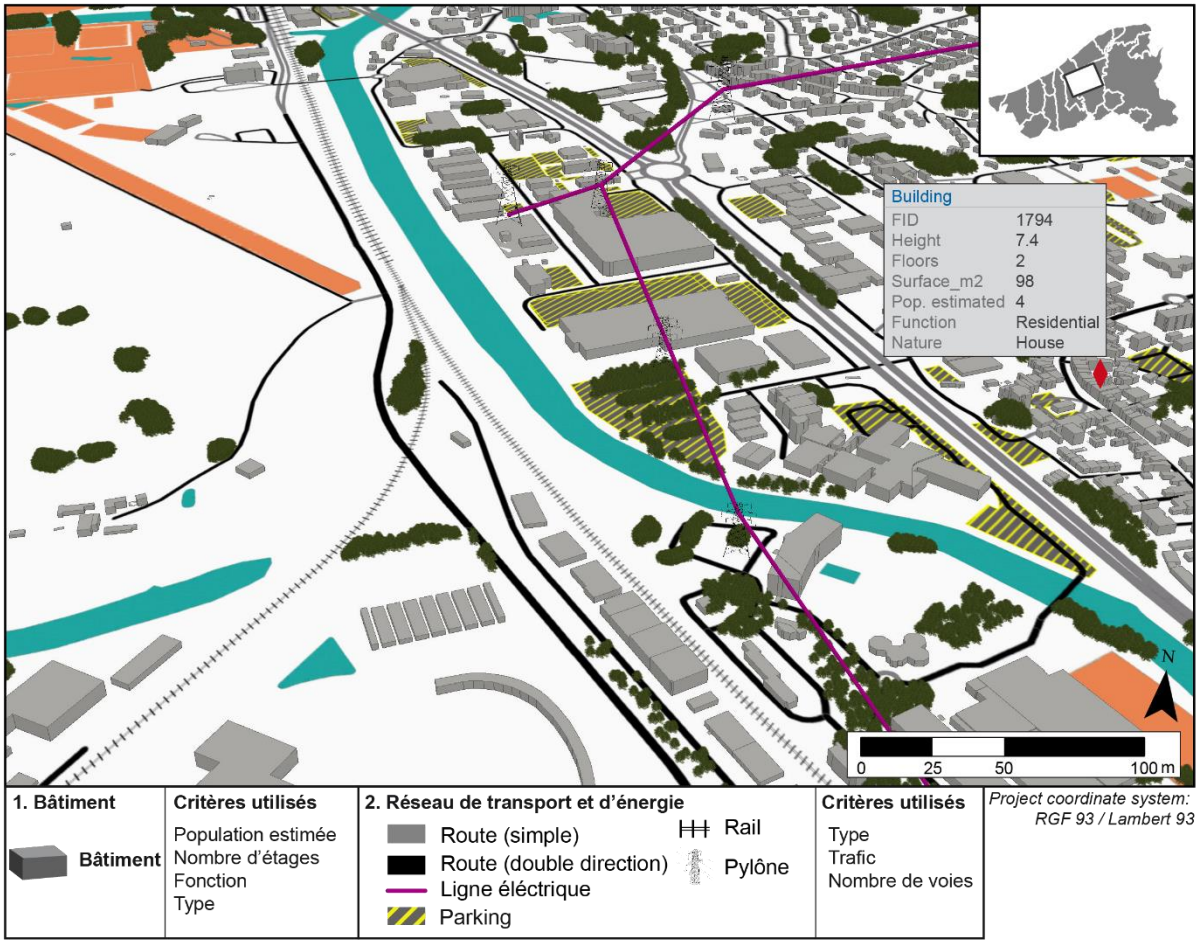


Figure 2.16 : Représentation 3D des résultats du modèle LSA à l'échelle large (zone d'activité située au sud de Deauville du site n°1) (Graff *et al.*, 2019b)

Comme pour le modèle MSA, les données issues du modèle LSA ont été validées par un tirage aléatoire avec un nombre d'échantillons calculé à partir de la formule de Cochran (5). Le contrôle des données a été réalisé sur les données attributaires et non sur les primitives géométriques issues du RGE® (Tableau 2.8).

Le nombre de personnes présentes par bâtiment n'était pas directement accessible pour pouvoir faire une comparaison des résultats obtenus. En effet, les données doivent être demandées, au cas par cas, auprès du centre des finances publiques départementales, ce qui est particulièrement long en raison des contrôles nécessaires pour vérifier le mode d'analyse projeté de ces données et assurer la confidentialité). À défaut d'autres données disponibles, la population par bâtiment n'a pas pu être comparée et la marge d'erreur n'a pas pu être calculée.

Tableau 2.8 Détermination du niveau de confiance du modèle LSA (marge d'erreur de 5 %)

Éléments exposés	*Bâtiment (type)*	*Bâtiment (fonction)*	*Bâtiment (nombre d'étages)*	*Bâtiment (population estimée)*	*Total*
Nombre d'items	31 319	31 319	31 319	ND	31 319
Taille échantillon	381	381	381	ND	1,143
Validation	339	349	307	ND	995
Erreur	42	32	74	ND	148
Validité	88,9%	9,6%	80,6%	ND	87,1%

La marge d'erreur des critères « type » et « fonction » est approximativement de 10 %. Le nombre d'étages présente les plus faibles taux de validité avec une marge d'erreur de 20 %. En l'absence d'éléments de comparaison de la population estimée, la marge d'erreur globale du modèle LSA d'environ 13 %. Au regard de la superficie du site (environ 150 km²) et du nombre important d'infrastructures (31 000 bâtiments et 1 200 km de linéaire routier), nous avons considéré la base de données comme suffisamment fiable pour être exploités à une échelle large.

2.4.1.3. Représentation 3D de la composante structurelle des éléments exposés à l'échelle locale

À l'échelle locale, le modèle LSA est utilisé pour intégrer des critères de structures complémentaires aux bâtiments et les primitives géométriques sont identiques à celles utilisées dans le RGE® à l'échelle large. (Figure 2.17).

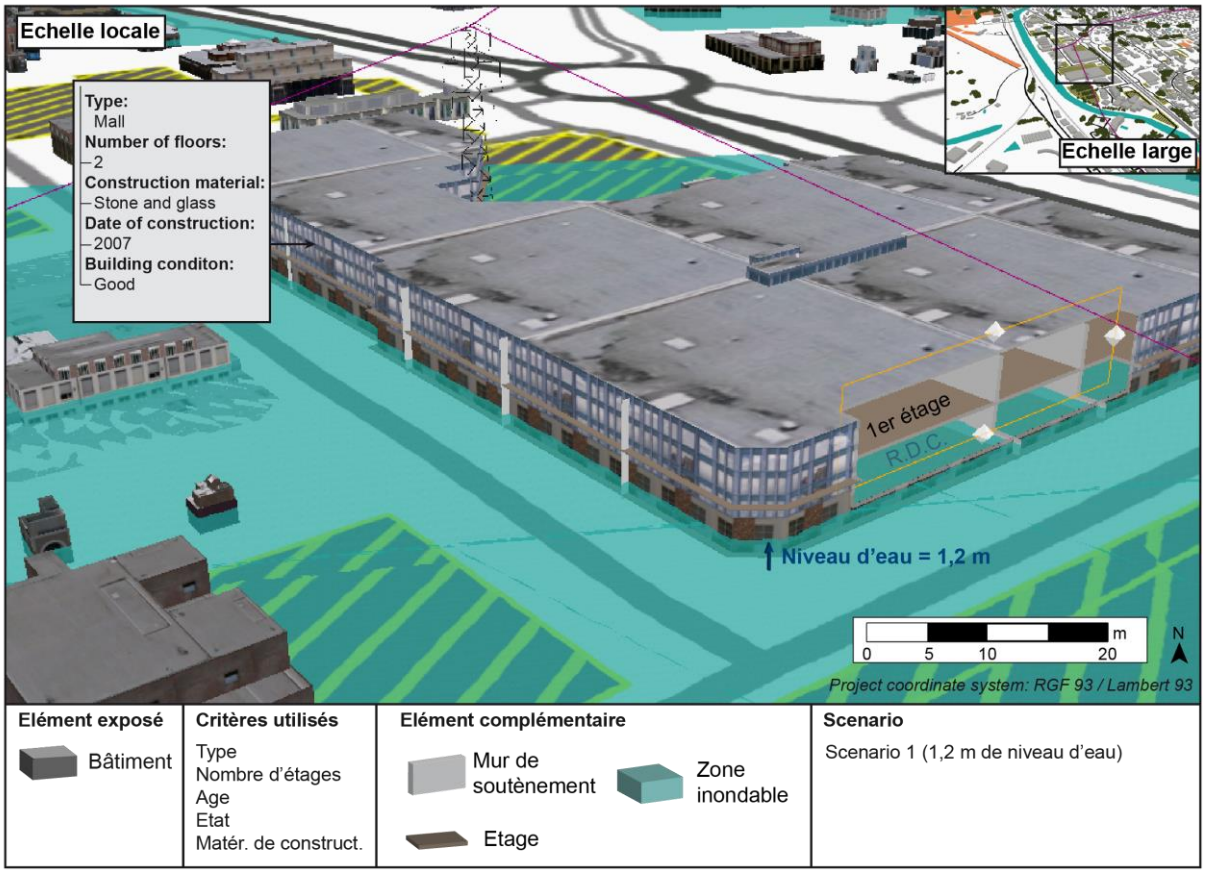


Figure 2.17 : Cartographie 3D des résultats du modèle LSA à échelle locale (Graff *et al.*, 2019b)

Les critères sont intégrés exclusivement sur quelques éléments, car ils requièrent une vérification sur le terrain et/ou par photo-interprétation (comprenant l'utilisation d'images Google Street View).

En première approche, les bâtiments historiquement localisés dans secteurs impactés par des phénomènes naturels générateurs de dommages ont été analysés (Figure 2.17). Sur le site d'étude n°1, 13 000 (42 %) bâtiments sont localisés dans au moins une zone d'aléa selon les plans de prévention des risques fournis par la DDTM (*cf.* chapitre 1). Parmi eux, 9 000 (28 %) bâtiments sont potentiellement affectés par des glissements de terrain et 4 200 (13 %) sont potentiellement affectés par des inondations. Un total 260 (1 %) bâtiments sont potentiellement affectés à la fois par des glissements et par des inondations. Ces 260 bâtiments sont principalement localisés entre la commune de Touques et la zone d'activité Deauville et Trouville-sur-Mer et ont été intégrés à l'analyse locale des éléments exposés.

Entre la commune de Touques et le sud de Deauville, 859 bâtiments ont été échantillonnés. On retrouve en grande majorité des pavillons (359) ainsi que des appartements (239). Les matériaux de construction utilisés sont des matériaux traditionnels pour les pavillons et du béton pour les bâtiments collectifs. La zone industrielle comprend environ une centaine de bâtiments, la plupart construits entre les années 1970 et 2000, en bon état, et en matériaux de construction mixte (*i.e.* béton, métal et porte-verres). Une trentaine de ces bâtiments ont été impactés durant les inondations du 1er juin 2003 avec plus de d'un mètre de hauteur d'eau (crue turbide) inondant la majeure partie des bâtiments industriels et commerciaux. Ces derniers sont principalement composés d'un seul niveau (étage) et les zones de stockage sont donc localisées au rez-de-chaussée.

2.4.2. Intérêts et limites d'une approche multiscalaire dans la caractérisation des éléments exposés par modélisation de processus ETL

Nous avons pu voir dans la section 2.4.1 les résultats des modèles d'intégration et d'harmonisation MSA et LSA à l'échelle du site d'étude n°1. Ces modèles ont été initialement prévus pour des éléments exposés localisés pour des territoires côtiers et leur transposabilité à des sites mêmes géographiquement proches (sites n°2 et n°3) a nécessité tout de même certaines adaptations des règles d'harmonisation impliquant de trouver de nouvelles ressources pour les modèles (*i.e.* de nouvelles bases de données) et également d'avantages de moyen pour l'application des modèles (*i.e.* temps nécessaire à l'adaptation des modèles).

Nous présentons ci-après l'analyse des ressources nécessaires à la transposabilité de ces modèles en termes de temps et de moyens pour l'application à des sites littoraux ainsi que la complémentarité des modèles d'harmonisation. Puis, nous présentons les résultats de la transposabilité des modèles MSA et LSA sur le site n°2 et les résultats de transposition du modèle MSA sur le site n°3.

2.4.2.1. Analyse des ressources nécessaires à la mise en place des modèles d'harmonisation et complémentarité des échelles

L'ensemble des jeux de données mis en avant dans la section 2.4.1 se présente sous un format vectoriel et chaque échelle est initialement indépendante des autres échelles. Afin d'ajuster une connexion entre ces échelles, nous avons dû établir des règles d'affichage. Les méthodes concernant les règles d'affichage spatiales restent peu abordées dans la littérature, mais peuvent être observées sur des plateformes d'organisme public ou privé comme Géoportail, Google maps ou Google Earth (Gorelick *et al.*, 2017). Chacune de ces plateformes héberge des données (extraites et harmonisées) sur un serveur où, grâce à l'utilisation d'un moteur (e.g.

Earth Engine Interactive), une interaction est rendue possible entre un utilisateur (observateur) et les données hébergées sur le serveur et produites à différentes échelles spatiales (Audebert *et al.*, 2016 ; Shi *et al.*, 2017). En partant de ce fonctionnement, nous avons défini des règles d'affichage sur chacune des couches de données issues des modèles MSA et LSA aux échelles d'analyses moyennes, larges et locales (Figure 2.18).

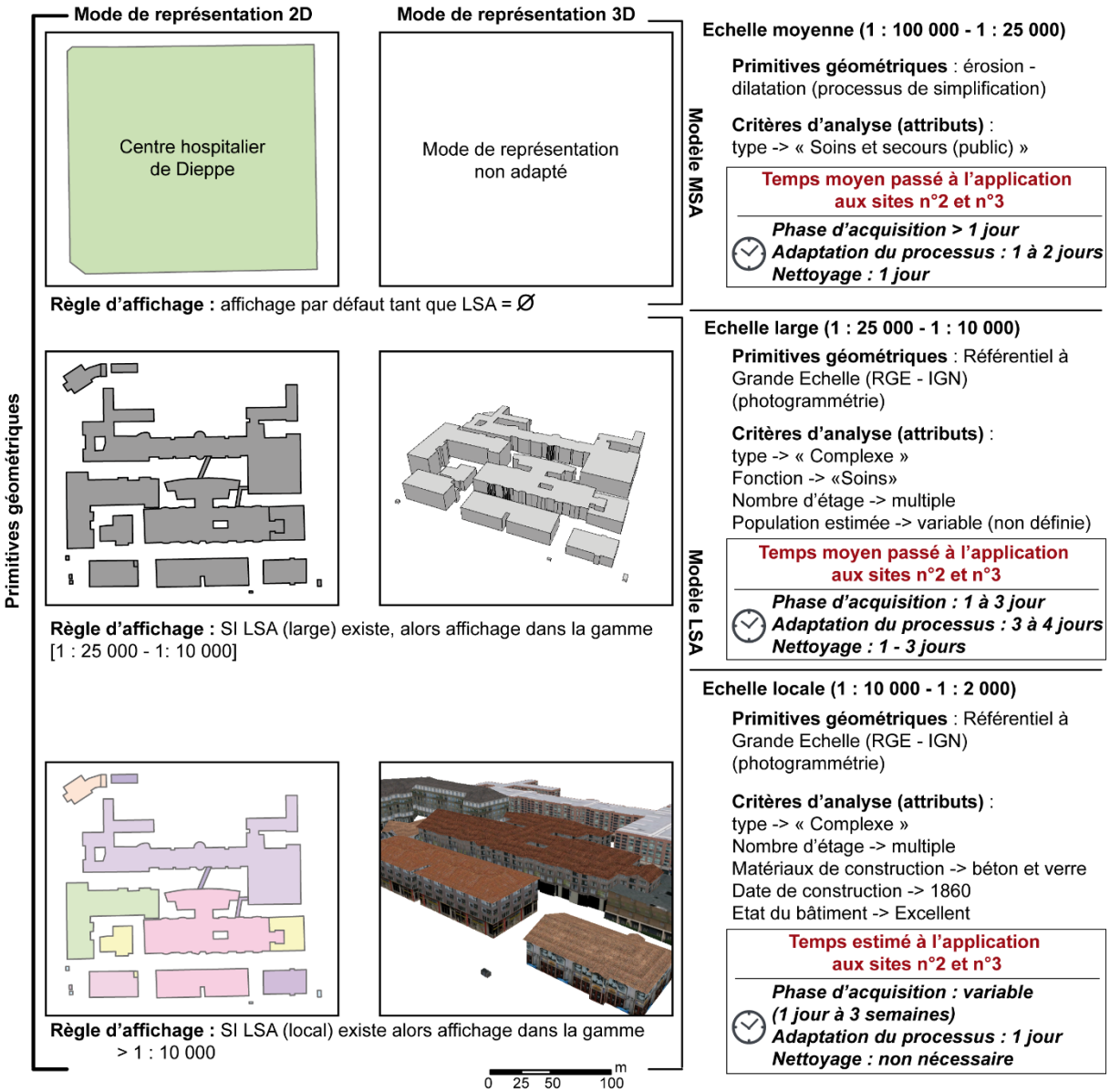


Figure 2.18 : Complémentarité des modèles d'harmonisation et moyens nécessaires à leur mise en place : l'exemple du centre hospitalier de Dieppe (76)

Les règles d'affichages élaborés dans un environnement SIG répondent aux conditions suivantes :

(1) Tant qu'aucune donnée n'existe (fonction *While*), les données du modèle MSA (condition) conservent un affichage à l'échelle moyenne par défaut ;

(2) Si la donnée existe à une échelle inférieure (large), lorsque l'utilisateur passe à un affichage entre le 1 : 25 000ème et le 1 : 10 000ème alors les données du modèle LSA sont affichées ;

(3) Si la donnée existe à une échelle inférieure (locale) et si l'utilisateur est en dessous d'un affichage au 1 : 10 000ème alors les données issues du modèle LSA prévu à échelle locale apparaissent.

Après la phase d'élaboration des modèles sur le site d'étude n°1, la transposabilité et l'adaptation du modèle MSA, comprenant la phase de recherche des données, ont nécessité deux jours sur le site n°2 et quatre jours sur le n°3. L'adaptation des règles d'harmonisation est assez rapide, nécessitant un à deux jours (intégration de lignes dans une feuille de calcul). Le site d'étude n°3 est à l'intersection de deux régions et la phase d'acquisition des données est plus complexe. Pour exemple, la base de données « MOS Normandie » est exclusivement produite à l'échelle de la Normandie et non à l'échelle de La Somme. Nous avons donc dû trouver des solutions alternatives pour remplacer ce manque d'information. La transposabilité du modèle LSA est plus longue, entre 4 jours (site n°2) à 7 jours (site n°3) en raison du nombre plus important de critères à vérifier que sur le modèle MSA et donc du total plus important de données à acquérir.

Par conséquent, pour une transposabilité efficace des modèles d'intégration et d'harmonisation, il est nécessaire, au préalable, d'avoir une bonne une bonne connaissance des bases de données disponibles sur les sites d'étude et un inventaire doit être réalisé pour le paramétrage des règles d'harmonisation et ainsi éviter des « vides » dans le renseignement des données. Une fois l'ensemble des bases de données identifiées et acquises, l'élaboration des règles d'harmonisation varient selon le nombre de critères intégrés dans les modèles :

(1) *À une échelle moyenne,* cette étape est relativement simple, car un seul critère est considéré : le « type » des éléments exposés. Quatre types d'éléments exposés sont alors considérés : (1) les zones bâties, (2) les réseaux, (3) les surfaces urbaines et (4) les zones agricoles. Le nombre d'items à vérifier est relativement rapide et se fait **sur une journée** ;

(2) *À échelle large*, le nombre de critères à intégrer est plus important pour les bâtiments et les réseaux. Le nombre de règles d'harmonisation à élaborer nécessite en moyenne entre trois et quatre jours de travail pour un utilisateur averti. La phase de vérification (nettoyage) est également plus longue au vu du nombre de critères à vérifier et peut prendre **un à trois jours de travail** selon le degré de confiance souhaité ;

(3) *À l'échelle locale,* l'adaptation des règles est similaire à celle de l'échelle large.

Ce qui constitue la force de ces modèles réside dans l'utilisation de multiples bases de données pour produire une information adaptée à différentes échelles spatiales. Mais cela représente également sa faiblesse si les données initialement intégrées sont de mauvaise qualité, alors les données de sorties en seront affectées en l'absence de vérification ou ajustement de l'information (e.g. décalage géométrique, erreurs sémantiques, etc.). En France, le référentiel à large échelle (RGE®, IGN) est recommandé pour l'ensemble des primitives géométriques.

2.4.2.2. Transposabilité des modèles d'harmonisation

L'extrapolation du modèle MSA et LSA au site n°2 (Figure 2.19**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et n°3 (Figure 2.20) nécessite des ajustements des bases de données utilisées ainsi que des règles d'harmonisation dans l'externalisation du processus. Seulement quatre communes sur 20 possèdent un PLU sur le site n°2 et deux communes en possèdent un sur les 23 identifiés sur le site n°3. Une solution alternative a consisté à utiliser une base de données tierce permettant de compléter l'information manquante telle que la base de données MOS Normandie (2009).

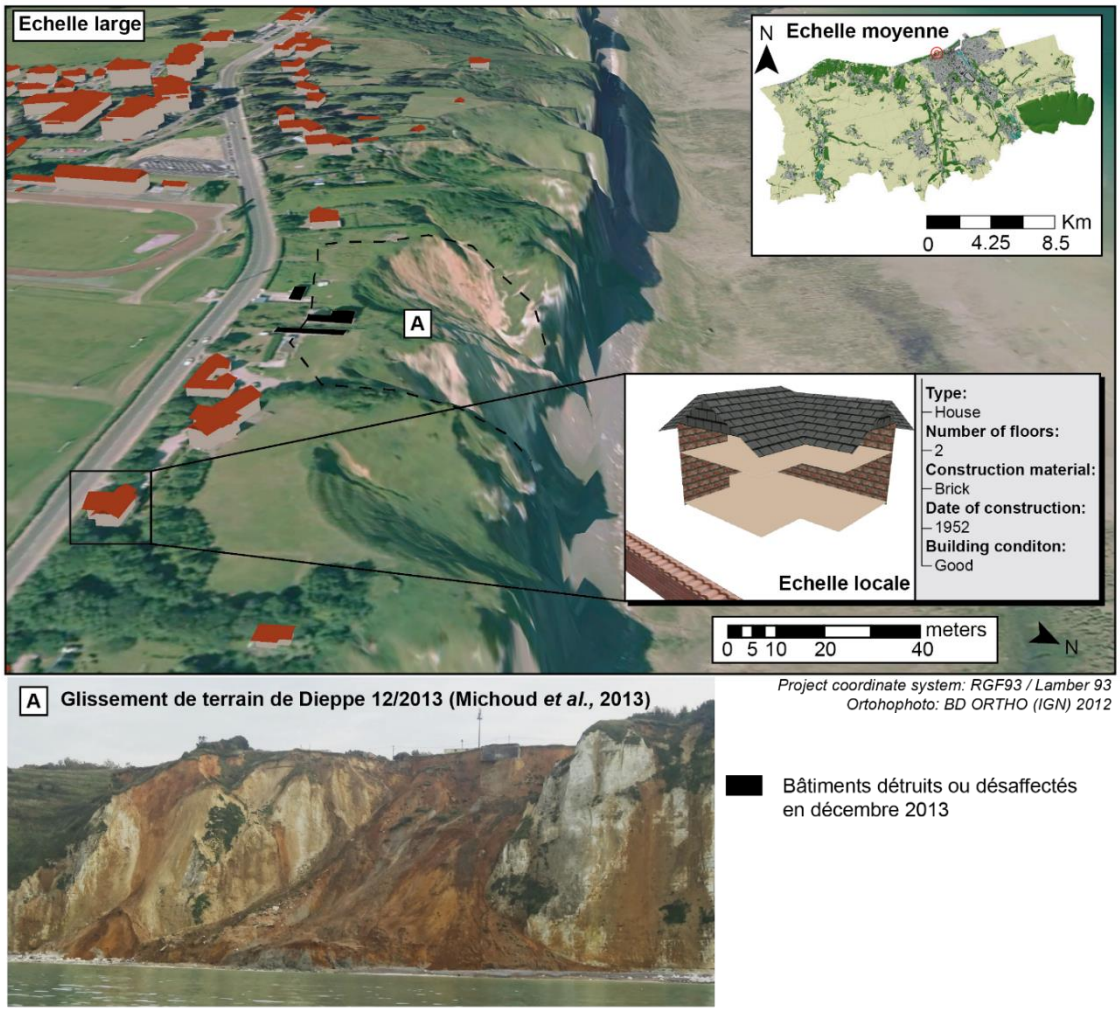


Figure 2.19 : Représentation cartographique (2D et 3D) des résultats issus des modèles MSA et LSA au site d'étude n°2

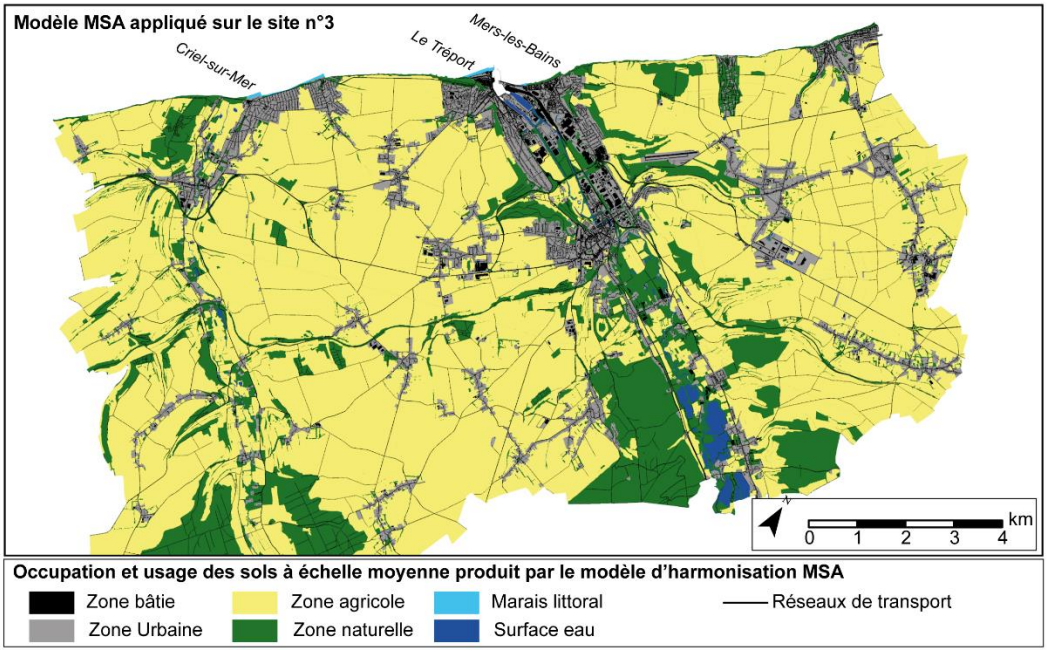


Figure 2.20 : Transposition du modèle MSA au site d'étude n°3 à une échelle moyenne

Cette adaptation requiert la vérification des règles d'harmonisation afin que les données puissent être comprises et intégrées au cube de données multidimensionnel (zone de stockage .gdb). En parallèle de la vérification des données, une attention doit être portée sur leur validité temporelle (Devillers et Jeansoulin, 2006 ; Fonte *et al.*, 2017 ; Zhang *et al.*, 2018). Cette nécessité de mise à jour de l'information est illustrée Figure 2.19 où les bâtiments détruits en décembre 2012 (Michoud *et al.*, 2013) apparaissent sur l'ortho photos de 2012, mais n'apparaissent pas dans la BD TOPO® (2017). Une fois implémentés, les modèles MSA et LSA sont prévus pour mettre à jour les données relativement facilement. La principale contrainte est liée à la mise à jour des règles d'harmonisation en cas de nouveaux éléments attributaires.

Fondamentalement, les outils des modèles de processus ETL peuvent être utilisés dans n'importe quel contexte géographique et dépendent exclusivement des bases de données disponibles. Ces outils bénéficient généralement de droit d'exclusivité par des organismes (privés ou publics) et restent encore peu présents dans le cadre de la recherche (Astriani et Trisminingsih, 2016 ; Amine *et al.*, 2016 ; Andersen *et al.*, 2018 ; Knap *et al.*, 2018). Ces modèles peuvent être adaptés à différents besoins comme l'intégration de multiples modèles numériques hydrologiques et topographiques pour la spatialisation des inondations aux États-Unis via le modèle cyberGIS (Figure 2.21).

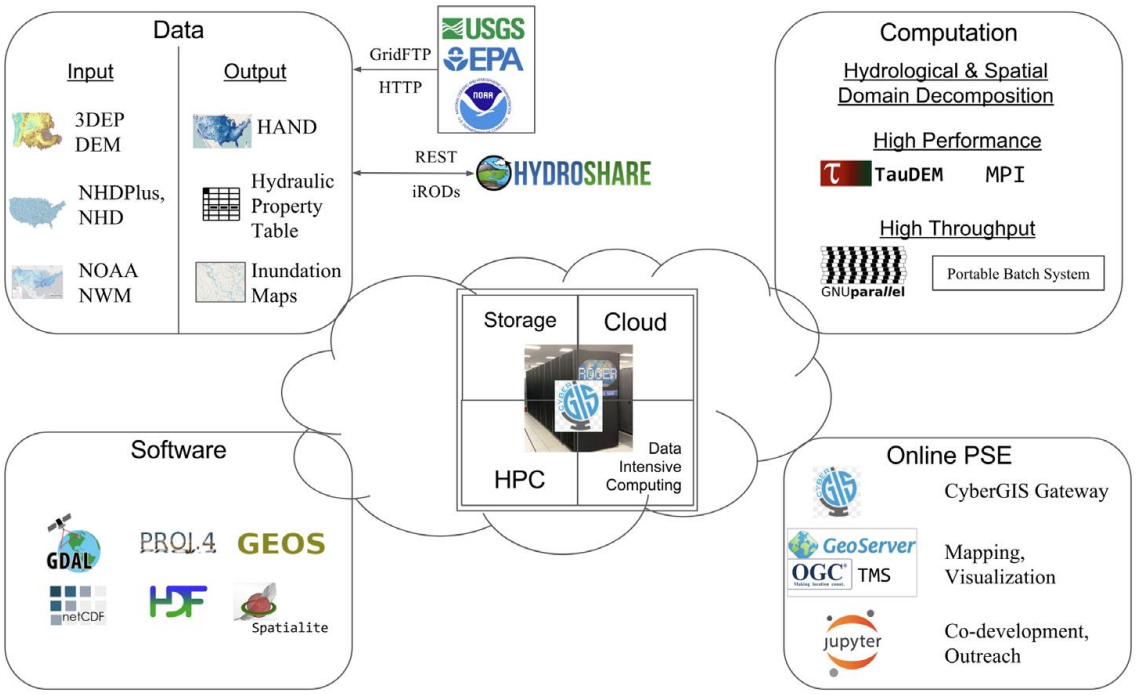


Figure 2.21 : Modèle d'intégration et d'harmonisation (ETL) des données dans le modèle cyberGIS (issu de de Liu *et al.*, 2018)

Selon les pays et le contexte (géographique, politique, etc.), la recherche de l'information peut être relativement longue et des demandes peuvent être envisagées auprès de différents fournisseurs. En règle générale, plus les sites sont isolés, moins la quantité d'information disponible est importante et donc moins les modèles sont efficaces. Un moyen de pallier le manque d'information est d'utiliser une procédure par *downscaling* (Bock *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 208). Cette solution implique une première phase d'acquisition des données à échelle moyenne, puis à une augmentation croissante de la précision des primitives géométriques ainsi que des variables attributaires. Cette précision des données doit alors se faire sur des secteurs

spécifiques : zones à multiples aléas ou à fortes conséquences potentielles (*i.e.* hotspots). À l'inverse, lorsque de nombreuses bases de données sont disponibles et de qualité, une approche par *upscaling* est à envisager (Angelopoulos *et al.*, 2017). Cette approche part de données précises et les généralise pour les adapter aux échelles larges ou moyennes. Cette approche permet d'obtenir l'ensemble des éléments exposés présents sur un territoire donné et à différentes précisions spatiales et attributaire.

En Europe et aux Groenland, 41 agences nationales sont spécialisées dans la production des données géographiques telle que l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), le National Geographic Institute of Belgium, le National Land Survey of Finland, etc. (Bol *et al.*, 2016). L'utilisation combinée de multiples bases de données augmente significativement la précision des données géographiques d'autant plus si des documents d'urbanisme sont disponibles dans les différentes communes.

2.4.3. Conclusion

Les résultats des modèles d'intégration et d'harmonisation MSA et LSA nous ont permis de caractériser les éléments exposés présents sur les sites d'étude à différentes échelles spatiales. Les modèles ont dans un premier temps été paramétrés et testés sur le site d'étude n°1.

À une échelle moyenne, les marges d'erreur du modèle MSA sont faibles avec une validité des résultats de 93 % sur 1 402 éléments échantillonnés. Le critère « type » est utilisé pour décrire quatre composantes du territoire :

(1) Les surfaces bâties correspondant à 1,7 % de la surface totale du site n°1. Ces surfaces sont composées majoritairement de résidences (environ 85 % de la surface bâtie totale) et d'industries (7 %) ;

(2) Les réseaux de transport et d'énergie représentent 1,8 % de la surface du site. Ces réseaux s'étalent sur un linéaire de 1 200 km, composés à 65 % de routes communales, à 20 % de chemins et à 10 % de routes départementales ;

(3) Les zones urbaines correspondant à 20 % de la surface du site. Elles se composent à 60 % de zone pavillonnaire, à 30 % de zones touristiques et de loisirs et à environ 8 % de centres urbains et zones d'habitats collectives ;

(4) Les zones agricoles et naturelles représentent au total 76 % de la superficie du site. Elles se composent a 33 % de prairies (agricoles ou naturelles), à 27 % de bois et forêts et 24 % de sites d'intérêt écologiques (ZNIEFF I et II).

À une échelle large, les marges d'erreur du modèle LSA sont faibles avec validité des résultats estimée à 87 % pour un échantillonnage total de 1 143 bâtiments et une validité des réseaux de transport et d'énergie de 100 %. Les critères utilisés permettent d'estimer :

(1) La présence physique (corporelle) des personnes au sein des bâtiments d'habitation (19 000) grâce au critère population estimée. En moyenne, le nombre de personnes estimé dans les pavillons et appartement est respectivement de 1,7 et 6,6. Le trafic des réseaux de transport est estimé avec l'importance du réseau avec une moyenne assez faible toutes routes confondues (4,1) ;

(2) La fonction de chacun des bâtiments qui se compose à 63 % de résidences, à 30 % d'entrepôts ou d'abris (jardins, cabanes, etc.) et à 10 % de bâtiments industriels ;

(3) La structure des bâtiments est déterminée grâce au type et au nombre d'étages. Environ 42 % des infrastructures sont des pavillons, 21% sont des appartements et 21 % des abris et entrepôts. Le nombre d'étages moyen par bâtiment est estimé à 2,1.

À une échelle locale, nous avons directement acquis les données par photo-interprétation et par une campagne de terrain pour les intégrer au modèle LSA. Les différents critères d'analyse, permettant de déterminer plus précisément la structure des bâtiments, ont été intégrés sur 859 bâtiments localisés la commune de Touques et le sud de Deauville. Environ 41 % sont des pavillons composés en moyenne de deux étages, en matériaux traditionnels, en bon état, construits entre les années 1970 et 2000. Environ de 28 % de ces bâtiments sont des bâtiments collectifs, composés en moyenne de 3 à 4 étages, en béton, en bon état et construits entre les années 1990 et 2000.

La transposabilité des modèles d'intégration et d'harmonisation aux sites d'étude n°2 et n°3 a permis d'estimer les principales contraintes et les durées nécessaires à l'adaptation des modèles. Les données obtenues sur la Normandie sont, en grande partie, produites pour une résolution large. L'adaptation à une échelle d'analyse moyenne (*Upscaling*) est donc relativement simple et nécessite entre 2 à 3 jours de travail pour l'élaboration du modèle MSA pour un utilisateur averti. L'intégration de multiples critères dans le modèle LSA à une échelle large, comprenant l'adaptation des règles d'harmonisation des données, nécessite plus de traitement et augmente la durée 5 à 10 jours selon les connaissances sur les bases de données. L'intégration de multiples critères sur la structure des bâtiments dans le modèle LSA, à une échelle locale, est dépendante des bases de données disponibles et de la nécessité ou non d'acquérir des données sur le terrain.

La transposition des modèles MSA et LSA au site d'étude n°3 nous a permis de mettre en avant un des inconvénients de la méthode. Sur un site localisé à cheval entre deux régions différentes (dans ce cas la Normandie et la Somme), la phase d'acquisition, de traitement de l'information, d'élaboration des règles d'harmonisation est beaucoup plus importante (avec un temps quasiment doublé). Pour exemple, les données utilisées ont pu être récupérées seulement sur la Normandie comme la base de données « MOS Normandie » ou la base de données sur la date des bâtiments (CETE). Il est donc préférable d'appliquer ces modèles à une échelle régionale pour avoir une certaine cohérence au niveau des informations disponibles.

Afin de créer un lien entre les données ainsi produites, nous avons implémenté dans une plateforme SIG plusieurs règles d'affichage. Ces règles d'affichage font ressortir les couches de données vectorielles en fonction de l'échelle d'analyse utilisée par l'opérateur (ou la personne consultant l'application).

2.5. Conclusion du chapitre

Dans le cadre de cette thèse et des objectifs assignés, le besoin de disposer d'une base de données des éléments exposés, sur les trois territoires territoire d'étude, nous a amené à développer des modèles d'harmonisation à trois échelles spatiales : moyenne, large et locale. Cette approche multiscalaire, dans la caractérisation des éléments exposés, a pour principal but de proposer une description à la fois détaillée et cohérente des différentes composantes du territoire (*i.e.* surfaces, infrastructures, etc.).

L'échelle moyenne propose une première analyse des éléments exposés présents sur les sites d'étude. Les éléments exposés sont analysés grâce à un unique critère d'analyse commun à

l'ensemble des éléments exposés (le « type »). Si cette information globale n'est pas suffisante, elle doit être complétée. Par conséquent, *l'échelle large* apporte davantage de précision sur les infrastructures (bâtiments et réseaux) du site d'étude. Trois formes de vulnérabilité sont considérées pour ces infrastructures : la vulnérabilité physique (corporelle), la vulnérabilité fonctionnelle et la vulnérabilité structurelle. De plus, la précision des primitives géométriques des infrastructures est plus fine à l'échelle large (issu du RGE® de l'IGN) qu'à l'échelle moyenne (issu de l'érosion - dilatation des vecteurs). Finalement, *l'échelle locale* permet de nuancer la structure des bâtiments en considérant cinq critères d'analyse par bâtiment (contre deux pour l'analyse de la structure à une échelle large).

La mise en place de l'analyse des éléments exposés à ces différentes échelles spatiales a nécessité d'une part l'utilisation de multiples bases de données géographiques et d'autre part l'harmonisation de ces bases de données. Ce travail a donc été rendu possible grâce à la disposition de nombreuses bases de données présente sur les sites d'étude telles que :

- Les bases de données géographiques produites par les institutions spécialisées ;
- Les bases de données volontaires (VGI) ;
- Les archives et autres sources d'information.

Les données harmonisées par le modèle MSA (sur la base du modèle de processus ETL) à une échelle moyenne ont un degré de confiance supérieur à 90 % (sur la base d'un tirage aléatoire). Pour exemple, les éléments exposés ainsi harmonisés sur le site d'étude n°1 (150 km²) sont principalement composés de prairies naturelles et agricoles, de zones pavillonnaires, de routes communales et de surfaces résidentielles. Les données harmonisées par le modèle LSA, à une échelle d'analyse large, ont été vérifiées avec un degré de confiance entre 80 % et 90 %. Le processus d'harmonisation s'opère en trois itérations au sein du modèle LSA. Sur le site n°1, la première itération harmonise 5 % de l'information globale, la deuxième itération harmonise 37,2 % de cette information et la troisième itération harmonise 100 % de l'information. Pour les deux modèles, les erreurs sont liées principalement à des éléments isolés (bâtiment dans un domaine abrité par la végétation, etc.). Plus le secteur est densément peuplé et fréquenté, plus le degré de précision des données est important. À l'échelle locale, nous avons recueilli les données par photo-interprétation et sur le terrain et le degré de confiance est donc de 100 %.

À partir de ces bases de données, une quantification des critères est réalisée dans le chapitre 3 sur la base de méthodes telles que le *Potential Damage Index* (Maquaire *et al.*, 2004 ; Malet *et al.*, 2006 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) et le *Relative Vulnerability Index* (Kappes *et al.*, 2012 ; van Westen *et al.*, 2014). Cette quantification permet ainsi une analyse des conséquences potentielles sur les éléments exposés dans des sites côtiers soumis à de multiples phénomènes naturels.

Chapitre 3. Quantification et analyse des conséquences potentielles par une approche multiscalaire

Sur la base des résultats issus des systèmes d'harmonisation (MSA et LSA – *cf.* chapitre 2) aux trois échelles d'analyse (moyenne, large et locale), l'objectif de ce chapitre est à présent d'évaluer les conséquences potentielles liées aux éléments exposés. La méthode de quantification est développée en trois étapes successives : (1) l'attribution d'un rang initial permettant de définir une valeur à chaque élément exposé aux trois échelles spatiales retenues ; (2) la mise en place d'un double système de pondération attributaire et spatial ; (3) l'utilisation d'un mode de combinaison des critères pour obtenir le degré de conséquence potentielle des éléments exposés. Les formes de conséquences considérées sont : les conséquences globales, structurelles, fonctionnelles et corporelles.

3.1. Introduction du chapitre

Dans les environnements côtiers, les dommages causés par les processus climatiques, marins ou continentaux tendent à prendre de plus en plus d'ampleur dans un contexte de changement global (IPCC, 2013 ; Planton *et al.*, 2015). En raison des interactions multiples de ces processus, il est nécessaire d'identifier, d'analyser et de mettre à jour régulièrement les secteurs de risque et leurs évolutions potentielles.

Dans ce contexte, le concept de risque s'articule autour de trois composantes : (1) la spatialisation des aléas, (2) l'analyse de la fréquence et de l'intensité des aléas et (3) l'évaluation de la vulnérabilité des éléments à risque comme les bâtiments, les réseaux, les surfaces agricoles et les zones urbanisées (Cardona 2004 ; Bollin et Hidajat 2006 ; Dilley *et al.* 2005 ; Birkmann 2007 ; Papathoma-Köhle *et al.* 2007). Cette définition comprend donc une évaluation initiale de l'aléa suivie d'une analyse de la vulnérabilité qui est définie comme les pertes/blessures potentielles d'un élément à risque (EaR) ou élément exposé (EE) en fonction de l'intensité de l'aléa (Papathoma-Köhle *et al.* 2007 ; Birkmann *et al.* 2013 ; Chang *et al.* 2015, ~~2018~~).

Dans un contexte multirisque, l'évaluation des aléas peut prendre un certain temps et, dans le cadre d'une évaluation de la vulnérabilité, les études sur les éléments exposés doivent être menées indépendamment des analyses d'aléa (Kappes *et al.* 2012b). Dans ce contexte, afin d'avoir une première estimation des pertes/blessures potentielles des EEs sans tenir compte des intensités ou fréquences des aléas, nous avons décidé de nous concentrer sur **l'évaluation des conséquences potentielles** (Crozier et Glade 2005 ; Corominas *et al.* 2013 ; Puissant *et al.* 2013 ; Eidsvig *et al.* 2017 ; Carlier *et al.* 2018).

La **quantification des conséquences potentielles** est une évaluation des dommages physiques (humains), économiques ou environnementaux possibles des éléments exposés au sein d'un territoire. Cette évaluation peut s'exprimer sous forme de rangs, d'indices ou de valeurs monétaires (Glade, 2003 ; Kappes *et al.*, 2012a ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Les conséquences potentielles ne considèrent donc pas un degré de perte en fonction d'un niveau d'aléa (vulnérabilité), mais représentent une valeur traduisant l'importance de l'élément pour un territoire en cas d'impact (Timmerman, 1981 ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; MATE/METL, 2016 ; ~~Post *et al.*, 2017~~ ; Geiß et Taubenböck, 2017). **Deux approches ont été développées** pour mesurer les différents types de conséquences potentielles et de vulnérabilité (Van Westen, 2000 ; Van Westen *et al.*, 2008 ; Kappes *et al.*, 2012a ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017) : les approches type « ingénierie », qui sont généralement utilisées dans un contexte opérationnel et les approches type « expert » développées dans un contexte de prévention (Muis *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2016 ; Penadés-Plà *et al.*, 2016).

Pour **les approches type « ingénierie »,** les méthodes telles que les courbes de vulnérabilité ou les ratios coûts-bénéfices fournissent une valeur absolue des éléments exposés exprimés en valeur monétaire ou degré de pertes (Akbas *et al.*, 2009 ; Totschnig *et al.*, 2011 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Parmi les **approches type « expert »** (appelées par la suite « méthodes expertes »), les méthodes par rang ou orientées « indice » fournissent une évaluation qualitative ou semi-quantitative des éléments exposés (Altenbach, 1995 ; Léone *et al.*, 1996 ; Malet *et al.*, 2006 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Alors que les méthodes développées dans une approche type « ingénierie » requièrent beaucoup de données et sont difficilement transposables à différentes échelles, les méthodes expertes sont plus faciles à mettre en place, mais engendrent d'importantes incertitudes (Kappes *et al.*, 2012b ; Puissant *et al.*, 2013).

Dans le but de réduire les incertitudes liées à une approche experte, les méthodes orientées « indices » ont été développées. Ces méthodes, telles que le « *Potential Damage Index -PDI-* »,

permettent de calculer des conséquences potentielles en affectant aux éléments exposés différents indices selon plusieurs critères d'analyses (Maquaire *et al.*, 2004 ; Birkmann, 2007 ; Puissant *et al.*, 2013 ; van Westen *et al.*, 2014 ; Chang *et al.*, 2015 ; De Brito and Evers, 2016 ; Carlier *et al.*, 2018). Cependant, l'approche PDI a été développée dans un contexte montagnard (Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) et simplement transposée dans un contexte littoral (Lissak, 2013).

Au regard des travaux réalisés, trois points significatifs ressortent : (1) actuellement, aucun consensus n'existe sur le nombre et la nature des critères à intégrer dans les méthodes orientées « indice » selon les environnements considérés ; (2) les conséquences potentielles sont généralement évaluées à une seule échelle d'analyse spatiale ; (3) les conséquences potentielles sont également évaluées pour l'ensemble d'un territoire donné, sans tenir compte des secteurs affectés par tel ou tel type de processus (ou d'aléa) permettant de pondérer les indices.

Sur la base des données issues des modèles MSA et LSA (*cf.* chapitre 2) ainsi que de la méthode PDI, un modèle de quantification des conséquences potentielles (Affectation, Pondération, Combinaison –APC-) est élaboré pour un environnement côtier à falaise soumis à plusieurs processus et pour les trois échelles spatiales retenues (moyenne, large et locale) (section 3.2). Ensuite, ce modèle APC est appliqué au territoire n°1 (Houlgate – Honfleur) et les résultats obtenus sont présentés puis discutés pour permettre de dégager les principaux apports, limites et incertitudes liés à ce modèle (section 3.3). Enfin, la section 3.4 présente succinctement deux approches possibles pour intégrer les conséquences potentielles obtenues par la méthode APC à des analyses de risque.

Une grande partie de ce chapitre reprend les développements de l'article « *Analysis and quantification of potential consequences in multirisk coastal context at different spatial scales (Normandy, France)* » de Kévin Graff, Candide Lissak, Yannick Thiery, Olivier Maquaire, Stéphane Costa et Benoit Laignel, publié par la revue « *Natural Hazards* » le 21 août 2019 (Graff *et al.,* 2019a). Cet article sera trouvé en annexe n°2.

3.2. Élaboration d'un modèle de quantification APC : Affectation, Pondération, Combinaison

Le développement méthodologique de quantification des conséquences potentielles des éléments exposés vise à mettre en avant le degré de perte potentielle pour le territoire en cas d'événement (e.g. inondation, glissement de terrain, recul des côtes, etc.). Ce degré de perte est évalué à différentes échelles spatiales (moyenne, large et local) en considérant des degrés de précisions variables en termes de primitives géométriques et de précision attributaire (Mensah *et al.*, 2017 ; Mistry *et al.*, 2017 ; Evin *et al.*, 2019). En parallèle, les systèmes de pondération développés dans ce modèle de quantification permettent de considérer l'environnement et l'importance des éléments exposés à travers l'utilisation de systèmes de pondération. Par conséquent, un modèle a été développé, nommé APC en référence aux **trois étapes successives** sur lequel il repose, à savoir : (1) l'affectation de valeurs aux attributs des critères d'analyse retenus, (2) la pondération attributaire et spatiale de ces critères d'analyse et (3) la combinaison de ces critères pour obtenir les conséquences potentielles.

Le modèle APC s'appuie sur une adaptation de la méthode PDI à un environnement côtier à falaise (section 3.2.1), sur une analyse des valeurs d'indices attribués dans le cadre des méthodes orientées « indice » (section 3.2.2), sur la mise en place d'un double système de pondération

spatial et attributaire (section 3.2.3) et sur la combinaison des critères attribués et pondérés aux différentes échelles d'analyse spatiales (section 3.2.4).

3.2.1. Adaptation de la méthode PDI à un environnement côtier à falaise

Inscrit dans une approche experte et dans la catégorie des méthodes orientées « indices » (semi-quantitatives), le développement méthodologique APC (Affection, Pondération, Combinaison) se fonde sur la méthode PDI (Potential Damage Index) développée dans le cadre du projet ALARM (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas, 2001 – 2004*) (Maquaire *et al.*, 2006). Cette méthode est développée initialement pour des glissements de terrain et pour un contexte montagneux et nécessite donc une adaptation à un environnement littoral soumis à des multiples événements et processus (e.g. inondation par débordement de cours d'eau, submersion marine, glissement de terrain, érosion des côtes rocheuses, etc.) (Maquaire, 1990 ; Costa, 1997 ; Laignel *et al.*, 2006, 2008 ; Lissak *et al.*, 2014 ; Letortu *et al.*, 2015 ; Turki *et al.*, 2015).

Ainsi, cette adaptation passe par une analyse des différentes composantes de la méthode PDI pour établir des modifications appropriées (3.2.1.1) et par l'attribution des différents types de conséquences potentielles en fonction des échelles d'analyses spatiales (échelle moyenne, large et locale) (3.2.1.2).

3.2.1.1. Adaptation de la méthode PDI en méthode APC

La méthode PDI considère l'ensemble des éléments exposés présents sur un territoire donné et pouvant être affecté par plusieurs types d'aléas et comprenant **deux catégories de conséquences potentielles** selon des impacts directs (corporel, structurel/fonctionnel) et indirects (socio-économiques) (Maquaire *et al.*, 2006 ; Lissak, 2012 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) :

- **Des conséquences directes** associées à des dommages corporels (*i.e.* blessures, lésions, décès, etc.), des dommages structurels et fonctionnels (*i.e.* endommagement des structures et perturbations des activités humaines) ;
- **Des conséquences indirectes** associées à des dommages socio-économiques (*i.e.* cessation d'activité, baisse de l'affluence touristique, temps de trajet supplémentaire en cas de rupture d'un réseau, etc.).

Pour chacun des impacts et pour les différents éléments exposés ou éléments à risque considérés, des critères d'analyse sont retenus (Figure 3.1). **Pour chacun des critères, un certain nombre d'attributs sont déterminés, puis ces attributs sont pondérés par des indices**. Cette attribution d'indices est issue d'un jugement expert (opérateur), puis discuté auprès des acteurs du territoire afin de diminuer en partie les incertitudes (Puissant *et al.*, 2013). Les indices attribués au sein des différents critères (C_{ep} – Coefficient d'endommagement potentiel) sont ensuite pondérés grâce à des coefficients (pondération attributaire) appelés coefficient d'intérêt local (C_{il}). Cette pondération prend en considération l'importance des critères au sein des activités socio-économiques du territoire d'étude (e.g. une zone artisanale peut représenter le cœur d'activité économique en termes de recrutement et de rentabilité entre plusieurs communes).

Tous les indices attribués au sein des différents critères sont ensuite combinés (système de combinaison linéaire) afin d'obtenir des cartes de conséquences potentielles pour l'ensemble des dommages directs et indirects. La combinaison de ces dommages directs et indirects donne une cartographie globale des conséquences potentielles totales (Malet *et al.*, 2006 ; Maquaire

et al., 2006 ; Lissak, 2012 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2017, 2018). Sans considérer le type d'aléa, les indices attribués peuvent être ajustés en considérant plusieurs scénarios : la distinction entre le jour et la nuit, entre les différentes saisons touristiques (hiver, été), etc.

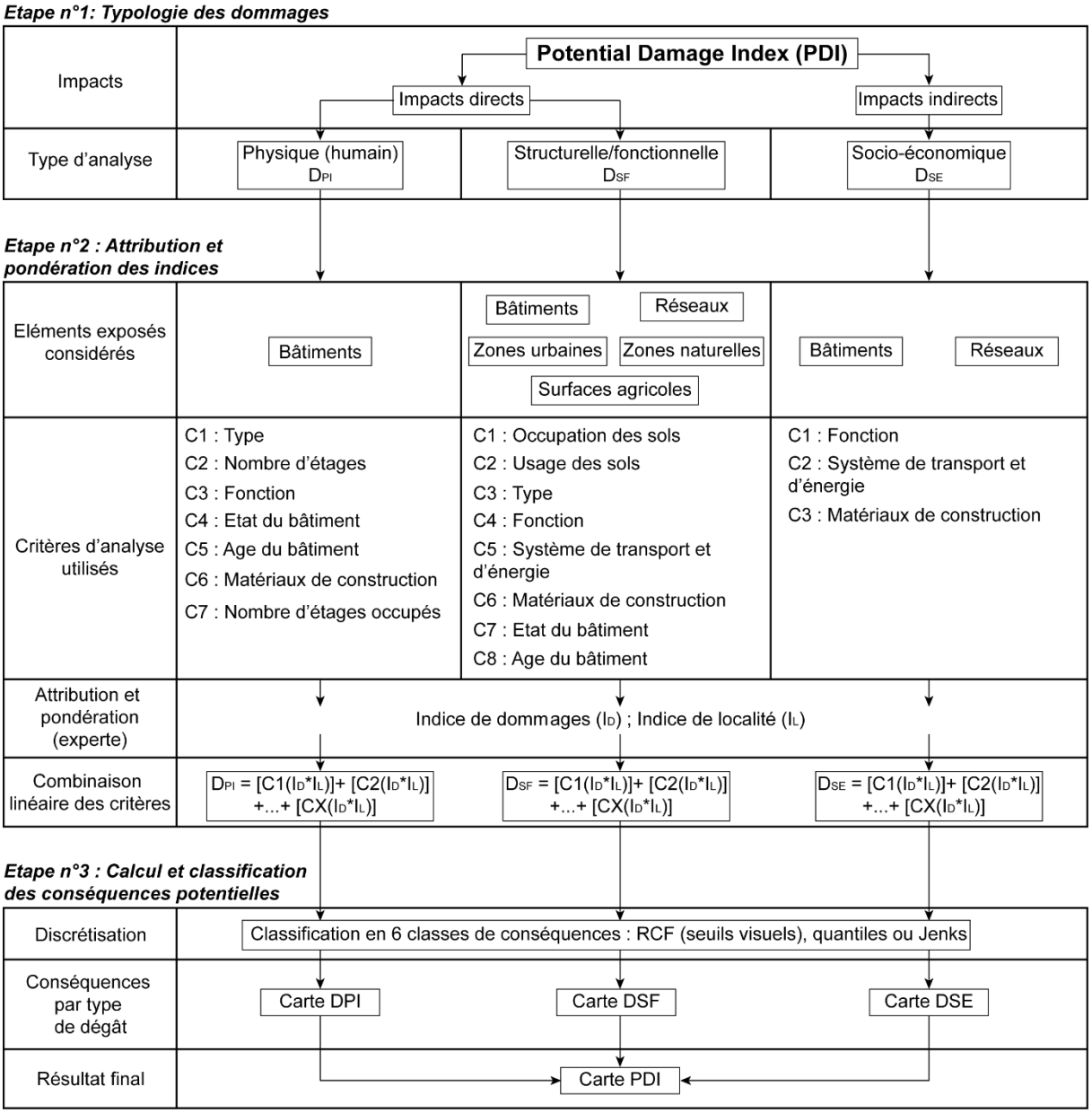


Figure 3.1 : Les différentes étapes de calcul de l'indice de dommages potentiels (PDI) pour estimer les conséquences à l'échelle régionale (d'après Puissant *et al.*, 2013)

En partant de cette méthode et dans le cadre de cette thèse de doctorat, la méthode APC (Affectation, Pondération, Combinaison) tente de simplifier l'analyse des dommages considérés et de réduire le nombre de critères utilisés pour chacune des catégories de conséquences potentielles (Figure 3.2).

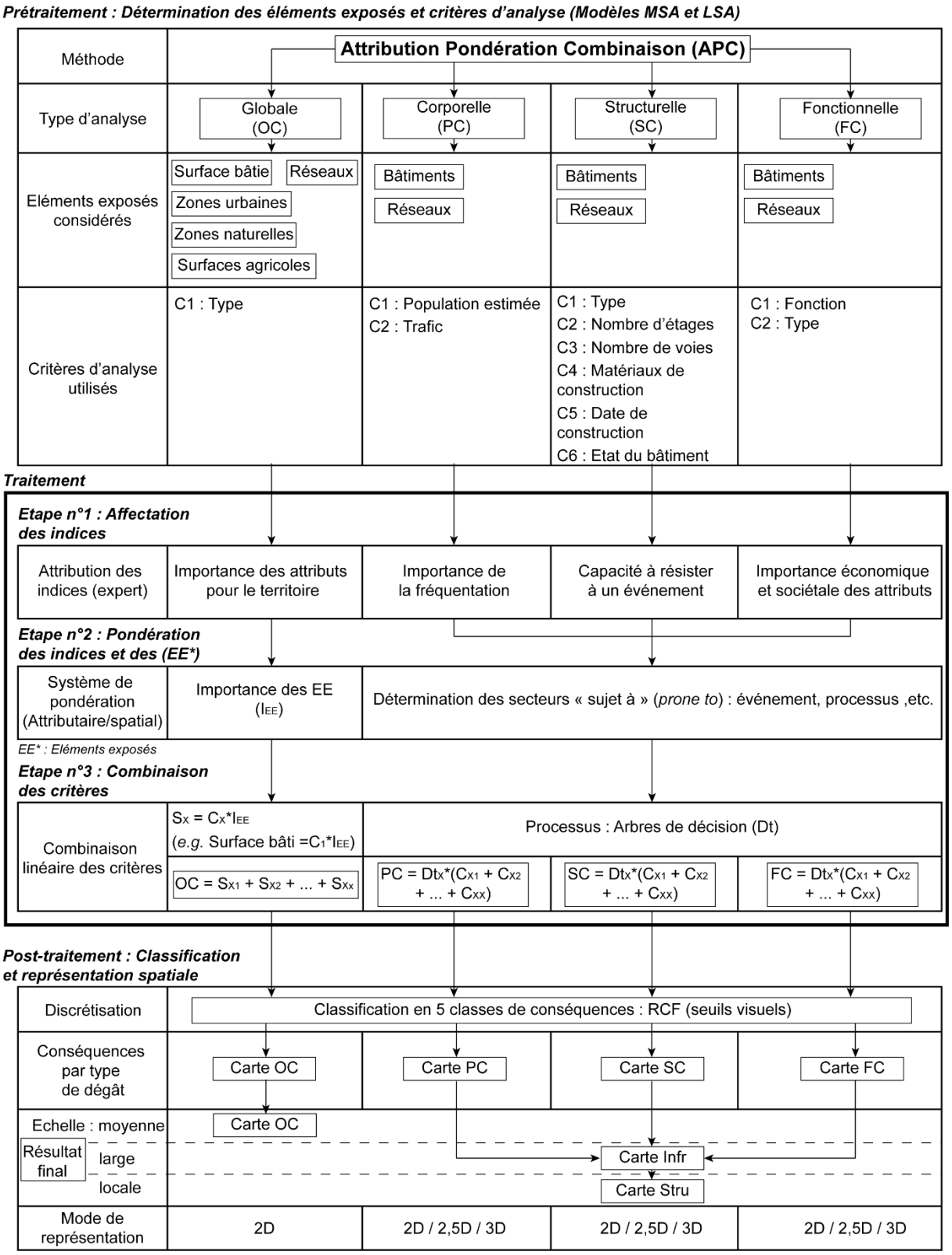


Figure 3.2 : Les étapes du développement méthodologique du modèle de quantification APC (Affection, Pondération, Combinaison) développé et adapté de la méthode PDI (*Potential Damage Index*)

Cette méthode repose sur **trois phases successives** :

- *Une phase de prétraitement* de bases de données multi-sources permettant d'identifier les éléments exposés et les critères les décrivant (issus des modèles MSA et LSA, *cf.* chapitre 2) ;
- *Une phase de traitement*, proprement dite et comprenant trois étapes : affectation des indices (étape 1), pondération des indices et des éléments exposés (étape 2) et combinaison des critères (étape 3) :
- *Une phase de post-traitement* conduisant à la classification et à la représentation spatiale des conséquences potentielles.

En phase de prétraitement, un premier tri est réalisé pour distinguer les différents éléments exposés considérés pour quatre types de conséquences potentielles (OC – *Overall Consequences,* PC – *Physical consequences*, SC – *Structural Consequences,* FC – *Functional Consequences)*. Les analyses des modes d'occupation et d'usages des sols (*i.e.* surface bâtie, zone urbaine, zone naturelle, etc.) sont issues de primitives géométriques avec un degré de généralisation important et sont regroupées dans une analyse des impacts globaux (OC – *Overall Consequences*) des éléments exposés. Les impacts corporels (PC – *Physical consequences*), structurels (SC – *Structural Consequences*) et fonctionnels (FC – *Functional Consequences*) concernent exclusivement les infrastructures du territoire (*i.e.* les bâtiments ainsi que les réseaux de transport et d'énergie).

Pour les quatre types de conséquences potentielles estimés (globale, corporelle, structurelle et fonctionnelle), les éléments exposés considérés et le nombre de critères d'analyse sont également réduits et adaptés afin d'éviter des redondances :

- Les conséquences globales intègrent l'ensemble des éléments exposés présents sur le territoire (surfaces bâties, zones urbaines, zones naturelles, surfaces agricoles et réseaux). Ils sont caractérisés en considérant le « type » d'élément comme critère d'analyse ;
- La composante corporelle considère comme éléments exposés, les seuls bâtiments et réseaux traduisant la présence (ou l'absence) de population dans les bâtiments résidentiels par exemple. Elle est caractérisée à travers les critères « population estimée » (bâtiments d'habitation) et « trafic » (réseaux de transport) (Akbas *et al.*, 2009 ; Kappes *et al.*, 2012b).
- La composante structurelle se définit comme l'enveloppe matérielle (interne ou externe) des éléments exposés (bâtiments et réseaux) en retenant, comme critères, le type, le nombre d'étages, le nombre de voies, les matériaux de construction, la date de construction et l'état du bâtiment (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007 ; Uzielli *et al.*, 2015) ;
- La composante fonctionnelle se définit comme l'ensemble des activités humaines (*i.e.* économique, touristique, agriculture, industrie, etc.) liées aux bâtiments et réseaux. Les critères d'analyse « fonction » et « type » sont utilisés (Totschnig *et al.*, 2011 ; Lissak *et al.*, 2013).

Pour la phase de traitement, une fois les éléments exposés et critères d'analyses considérés en prétraitement, *l'étape n°1 (affectation des indices)* consiste à affecter des indices en considérant : l'importance des attributs (e.g. centre de soin, poste de secours, casino, etc.) des critères d'analyse pour le territoire (OC, FC) ; le nombre de personnes par bâtiment (d'habitation) ou la fréquentation des réseaux (PC) ainsi que la capacité d'un élément à résister à différents événements (SC). *En étape n°2 (pondération des indices et des éléments exposés)*, un

double système de pondération attributaire et spatiale est utilisé pour considérer soit l'importance du critère d'analyse ou de l'élément exposé au sein du territoire, soit seulement des éléments exposés situés dans des secteurs sujets à tel ou tel type de processus et/ou d'aléa (e.g. plaine sujette à des inondations par submersion ou débordement, versants sujets à des glissements de terrain, etc.). *L'étape n°3 (combinaison de critères)* consiste en un système de combinaison linéaire des critères s'appuyant ou non sur des arbres de décision (Figure 3.3).

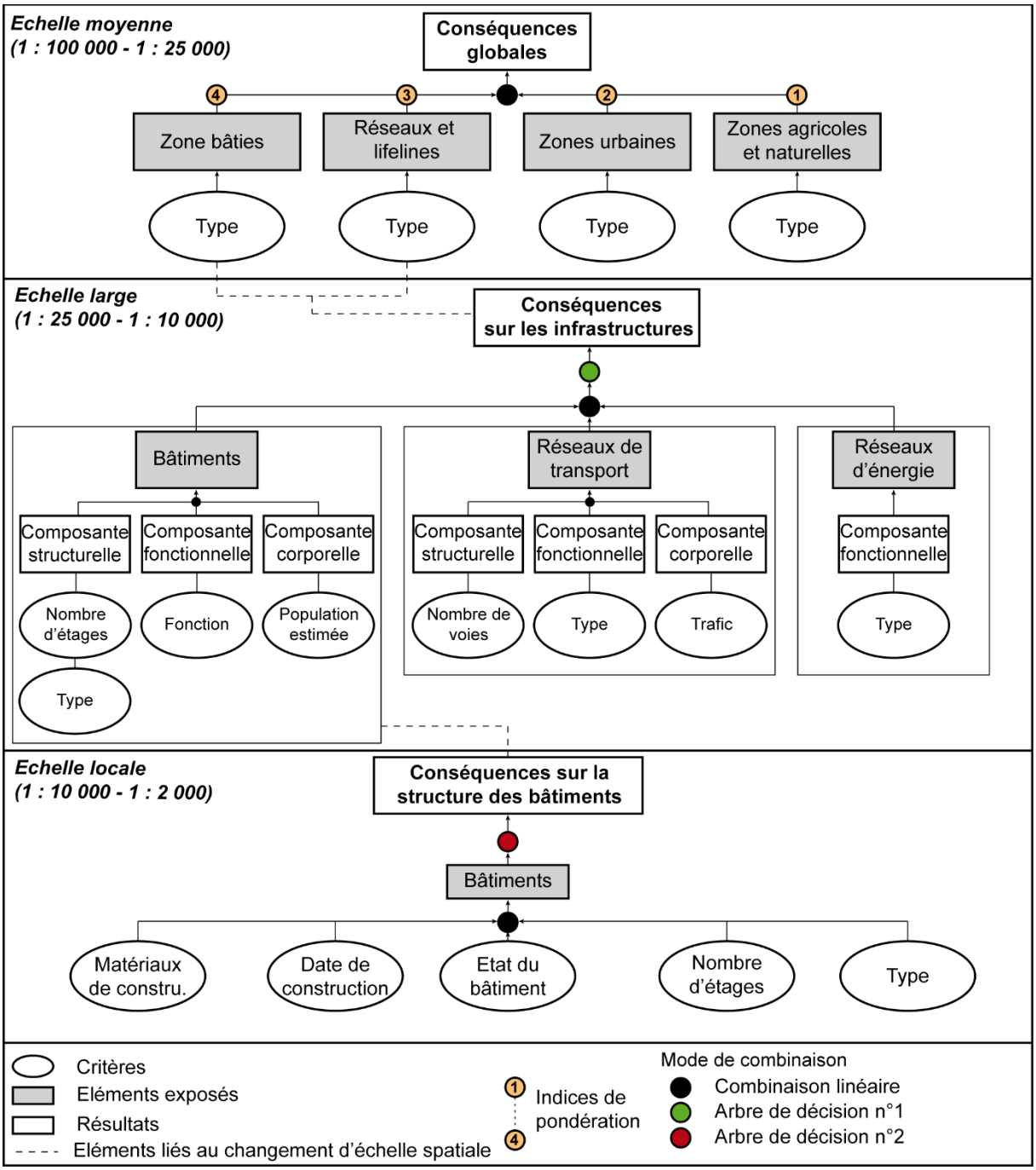


Figure 3.3 : Organisation générale du modèle de quantification APC (Affectation, Pondération et Combinaison) aux trois échelles d'analyse (Graff *et al.*, 2019a)

À partir des données géographiques obtenues précédemment, ***la phase de post-traitement*** établit des règles d'affichage, de cartographie et d'association des conséquences potentielles. Ainsi, des cartes de conséquences potentielles peuvent être produites pour chaque type de

dommages, selon cinq classes de conséquences (classes établies selon des seuils visuels à partir des courbes cumulées de distribution des valeurs obtenues : le seuillage est détaillé à la section 4.2.4.1) : carte des **conséquences globales** (OC), carte des **conséquences corporelles** (CP), carte des **conséquences structurelles** (SC) et carte des **conséquences fonctionnelles** (FC). Ensuite, selon les échelles d'analyse considérées (moyenne, large et locale – *cf.* section suivante), des combinaisons peuvent ou non être réalisées. Les conséquences globales (OC) sont calculées seulement à l'échelle moyenne et ne sont donc pas prévues pour être combinées ni pour être utilisées aux échelles large et locale. Le mode de représentation à privilégier est la cartographie 2D traditionnelle. Les conséquences physiques, structurelles et fonctionnelles peuvent être associées afin d'être synthétisées pour une échelle large. À cette échelle large, diverses représentations sont possibles, mais des modes de représentation 2,5D ou 3D sont à privilégier selon la performance des processeurs et de la carte graphique de l'opérateur (Longo et Haggard, 2012 ; Henriques et Vedaldi, 2018). A l'échelle locale, les conséquences potentielles sur les bâtiments traduisent en quelque sorte, la capacité des bâtiments à plus ou moins bien résister selon les sollicitations des différents processus.

3.2.1.2. Définition des conséquences potentielles aux échelles d'analyse spatiale

Comme évoqué précédemment, trois échelles spatiales (moyenne, large et locale) ont été retenues pour évaluer et quantifier les conséquences potentielles (van Westen, 2000 ; van Westen *et al.*, 2008). Toutes les données utilisées sont issues des systèmes de combinaison des modèles MSA et LSA (*cf.* chapitre 2) (Figure 3.3).

L'échelle d'analyse moyenne (1 : 100 000 – 1 : 25 000) est prévue pour une **quantification globale des conséquences potentielles**. Ces conséquences globales considèrent l'ensemble des éléments présents sur le territoire en fonction de leur importance et sans considérer leur environnement direct. Le « **type** » des éléments exposés est le seul critère d'analyse considéré à cette échelle afin de conserver une information simplifiée, mais globale. Les types d'éléments exposés considérés sont les zones bâties, les réseaux (transport et énergie), les zones urbaines ainsi que les zones agricoles et naturelles (Kubal *et al.*, 2009 ; Sheuer *et al.*, 2011). Les primitives géométriques des zones bâties sont simplifiées pour conserver une cohérence de résolution spatiale.

À l'**échelle large** (1 : 25 000 – 1 : 10 000), l'analyse et la quantification des **conséquences potentielles** portent **sur les infrastructures**, c'est-à-dire l'ensemble des constructions anthropiques comme les bâtiments et les réseaux (transport et énergie) (Cascini *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018). Les primitives géométriques utilisées sont issues du RGE® (IGN) avec une précision métrique.

À l'**échelle locale** (1 : 10 000 – 1 : 2 000), le modèle se focalise plus spécifiquement **sur la structure des bâtiments** en intégrant cinq critères d'analyse (matériaux de construction, date de construction, état du bâtiment, type et nombre d'étages). Cela a pour but de considérer le comportement de la structure à différents types d'événement (*i.e.* inondation, glissement de terrain et combinaison des deux) (Kappes *et al.*, 2012a ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Papathoma-Khöle *et al.*, 2017 ; Milanesi *et al.*, 2018). Les conséquences fonctionnelles et corporelles sont exclues à cette échelle en raison d'un manque d'information disponible sur les éléments exposés (bâtiments et réseaux) permettant d'apporter une véritable plus-value à l'analyse qui serait conduite à cette échelle par rapport aux résultats obtenus à l'échelle large : pas ou très peu d'informations sur le coût direct et indirect à court, moyen et long terme pour un bâtiment commercial par exemple, ou la durée d'occupation des bâtiments d'habitation (résidence principale ou secondaire).

3.2.2. Affectation des indices aux attributs des critères d'analyse par une méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

La première phase du modèle APC consiste à attribuer des valeurs d'indice aux attributs des critères d'analyse permettant de décrire les éléments exposés. Fondées sur un jugement expert, différentes méthodes ont été développées pour réduire en partie ces incertitudes. Une pondération relative peut être définie à partir des distributions statistiques ou de valeurs d'appartenance à partir d'un processus de logique floue qui consiste en une transformation d'une donnée initiale en une nouvelle valeur répondant à différentes conditions (Nezarat *et al.*, 2015). Une autre option consiste à utiliser *un processus analytique hiérarchique* (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) pour **attribuer un poids aux différents attributs** à **partir d'un classement** (rang) des éléments considérés (Saaty, 2006 ; van Westen *et al.*, 2008 ; Nezarat *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2017). Alors que les méthodes statistiques d'attribution des indices peuvent être relativement longues ou complexes à appliquer, la méthode AHP (système de classement) est une des plus efficaces à mettre en place et à transposer dans différents environnements (Mouroux et Brun, 2006 ; Cooke *et al.*, 2008 ; Khan et Samadder, 2015 ; Gumus *et al.*, 2016 ; Van der Fels-Klerx *et al.*, 2018).

Cette méthode est maintenant appliquée aux échelles d'analyse spatiale moyenne (section 3.2.2.1) et large (section 3.2.2.2). À une échelle locale (section 3.2.2.3), la capacité de résistance des structures sera considérée d'après des indices attribués dans la littérature scientifique selon des sollicitations liées soit à une inondation, soit à un glissement de terrain et soit aux deux événements.

3.2.2.1. Affectation des indices aux attributs des critères d'analyse globaux à une échelle moyenne

La première étape de la méthode APH est d'attribuer un rang à chaque attribut des critères. Ce rang est ensuite transformé en indice en rapportant le rang d'un attribut x par rapport à la valeur de rang maximale au sein du critère d'analyse ($c(x)$) (Nezarat *et al.*, 2015 ; van der Fels-Klerx *et al.*, 2018) [1].

$$[1]\ Méthode\ APH \rightarrow\ Indice_x = \frac{Rang_{c(x)}}{max\ (rang)_{c(x)}}$$

L'attribution du rang s'opère à travers une analyse des méthodes orientées « indices » dans la littérature aux différentes échelles d'analyses spatiales considérées (Camarasa Belmonte *et al.*, 2011 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Ouma and Tateishi, 2014). Au regard de la disparité des attributs et critères utilisés dans la littérature, la comparaison des indices a été effectuée sur des éléments identiques ou similaires (Tableau 3.1). Le cas échéant, une valeur N.D. (non documenté) est attribuée. Le rang attribué est ensuite réajusté en fonction de la distribution des éléments (*i.e.* un élément sur (ou sous) représenté sur le territoire voit son rang réajusté en fonction de son importance).

Tableau 3.1. Attribution et comparaison des valeurs d'indices aux attributs définis dans le cadre d'une analyse des conséquences globales à l'échelle moyenne

			Graff et al. (2019a)		*Camarasa Belmonte et al. (2011)*	*Ouma et Tateishi (2014)*	*Puissant et al. (2013)*
EE	**Critère**	**Attribut**	**Rang**	**Indice**	**Indice**	**Indice**	**Indice**
Surface bâtie	Type	Autre	1	0,13	1,00	N.D.	N.D.
		Construction légère	2	0,25	N.D.	N.D.	N.D.
		Résidence	3	0,38	4,00	N.D.	N.D.
		Ferme	4	0,50	N.D.	N.D.	N.D.
		Industrie	5	0,63	3,00	N.D.	N.D.
		Commerce	6	0,75	4,00	N.D.	N.D.
		Monument	7	0,88	N.D.	N.D.	N.D.
		Public	8	1,00	2,00	N.D.	N.D.
Réseau	Type	Chemin	1	0,14	N.D.	N.D.	0,1
		Route	2	0,29	N.D.	N.D.	0,6
		Départementale	3	0,43	N.D.	N.D.	0,8
		Nationale	4	0,57	N.D.	N.D.	0,8
		Autoroute	5	0,71	N.D.	N.D.	1
		Voie ferrée	6	0,86	N.D.	N.D.	1
		Ligne électrique	7	1,00	N.D.	N.D.	[1 - 0,8]
Zone urbaine	Type	Zone à urbaniser	1	0,09	N.D.	N.D.	N.D.
		Loisir et tourisme	2	0,18	N.D.	N.D.	[0,8 - 0,5]
		Agroalimentaire	3	0,27	N.D.	2	N.D.
		Zone pavillonnaire	3	0,27	4,00	3	1
		Camping	4	0,36	N.D.	N.D.	[0,8 - 0,5]
		Habitat collectif	5	0,45	4,00	3	1
		Zone industrielle	6	0,55	3,00	2	1
		Zone commerciale	7	0,64	4,00	1	1
		Centre urbain	8	0,73	4,00	3	1
		Transport	9	0,82	N.D.	2	1
		Utilité publique	10	0,91	8,00	4	1
		Soin et secours	11	1,00	8,00	4	1
Surface agricole et naturelle	Type	Surface en eau	1	0,13	0,00	N.D.	0,1
		Autre	2	0,25	0,00	N.D.	0,05
		Surface en herbe	3	0,38	0,00	N.D.	0,35
		Bois et forêt	4	0,50	0,00	N.D.	0,3
		Haie	5	0,63	0,00	N.D.	N.D.
		Culture permanente	6	0,75	0,00	N.D.	N.D.
		Terres arables	7	0,88	0,00	5	0,25
		Zone protégée	8	1,00	0,00	N.D.	N.D.

N.D. : non documenté.

Les surfaces bâties, les résidences et les constructions légères sont présentes sur l'ensemble du territoire et en grande quantité. Attribuer une valeur trop grande à cet attribut empêche alors de distinguer les autres éléments du territoire tels que les zones bâties publiques (intégrant les centres de soin et de secours), les monuments, les commerces ou les industries. Pour les réseaux, une plus grande importance est attribuée aux systèmes d'énergies et aux axes de transport majeurs (*i.e.* voies ferrées et autoroutes). Pour les zones urbaines (entité administrative et juridique), un poids significatif est attribué aux centres de soins et de secours, aux sites d'utilité publics (écoles, bâtiments administratifs et de service, etc.) et aux nœuds de réseaux de transport (gare ferroviaire, péage, etc.). Les zones protégées (ZNIEFF I, ZNIEFF II et Natura 2000), les terres arables et cultures permanentes représentent également des enjeux économiques majeurs pour les communes des sites d'étude.

3.2.2.2. Affectation des indices aux critères d'analyses des infrastructures à une échelle large

Quatre critères d'analyses sont utilisés pour caractériser les bâtiments à une échelle large. Au sein du critère « type », les complexes (centre touristique, de loisir, casino, etc.), les stations (gaz, essence, etc.) ainsi que les centres commerciaux sont très présents dans ces territoires littoraux (*cf.* chapitre 1). En terme de fonctionnalité, les centres de soins et de secours, les systèmes de production énergétique ainsi que l'ensemble des bâtiments liés à l'éducation (école, collège, etc.) sont retenus. Pour les critères « population estimée » (au sein des bâtiments d'habitation) et « nombre d'étages », la valeur attributaire et le rang attribué dépendent du nombre d'étages du bâtiment considéré (Tableau 3.2).

Tableau 3.2. Attribution et comparaison des valeurs d'indices aux attributs définis dans le cadre d'une analyse des conséquences sur les infrastructures à l'échelle large

			Graff et al. (2019a)		*Lissak (2012)*	*Puissant et al. (2013)*	*Carlier et al. (2018)*
EE	**Critère**	**Attribut**	**Rang**	**Indice**	**Indice**	**Indice**	**Indice**
Bâtiment	Type	Autre	0	0,00	N.D.	N.D.	N.D.
		Abri/cabane	1	0,09	0,10	0,10	0,10
		Entrepôt	2	0,18	0,50	0,50	0,50
		Maison	3	0,27	1,00	1,00	1,00
		Ferme	4	0,36	0,95	N.D.	1,00
		Bâtiment collectif	5	0,45	0,30	N.D.	1,00
		Bâtiment mixte	6	0,55	N.D.	N.D.	N.D.
		Industrie	6	0,55	0,40	0,40	N.D.
		Bureau	7	0,64	0,30	0,90	N.D.
		Château	8	0,73	0,30	0,90	N.D.
		Église	8	0,73	0,80	0,30	0,30
		Monument	8	0,73	0,80	0,30	0,30
		Tour	8	0,73	0,80	0,30	0,30
		Centre commercial	9	0,82	0,80	0,30	0,30
		Station (gaz, etc.)	10	0,91	0,30	N.D.	1,00
		Complexe	11	1,00	0,30	N.D.	1,00
	Fonction	Abandonnée/aucune	0	0,00	0,20	N.D.	N.D.
		Garage, remise, etc.	1	0,09	N.D.	N.D.	N.D.
		Religion	2	0,18	0,20	0,20	0,20
		Stockage	2	0,18	N.D.	N.D.	N.D.
		Résidentielle	3	0,27	0,80	0,80	0,80
		Agroalimentaire	4	0,36	0,90	0,40	0,40
		Commerciale	5	0,45	0,90	0,90	0,90
		Industrielle	5	0,45	0,00	0,90	0,90
		Résidence-commerce	6	0,55	N.D.	N.D.	N.D.
		Administrative	6	0,55	0,70	0,70	0,70
		Tourisme	7	0,64	0,80	0,80	0,80
		Loisir	7	0,64	0,80	0,80	0,80
		Transport	8	0,73	0,80	0,80	N.D.
		Education	9	0,82	1,00	1,00	1,00
		Énergie	10	0,91	N.D.	N.D.	N.D.
		Soin et secours	11	1,00	0,95	0,95	0,95
	Population estimée	0	0	0,00	N.D.	N.D.	N.D.
		[1 - 2]	1	0,17	N.D.	N.D.	N.D.
		[3 - 4]	2	0,33	N.D.	N.D.	N.D.
		[5 - 6]	3	0,50	N.D.	N.D.	N.D.
		[7 - 8]	4	0,67	N.D.	N.D.	N.D.
		[9 - 10]	5	0,83	N.D.	N.D.	N.D.

		> 10	6	1,00	N.D.	N.D.	N.D.
	Nombre d'étages	1	1	0,14	0,50	0,70	1,00
		2	2	0,29	0,60	0,70	0,70
		3	3	0,43	0,70	0,85	0,50
		4	4	0,57	0,70	0,85	0,50
		5	5	0,71	0,80	0,85	0,50
		6	6	0,86	0,80	0,85	0,50
		> 6	7	1,00	1,00	1,00	0,50
Réseaux	Type	Chemin	1	0,11	0,30	0,10	0,10
		Route	2	0,22	0,60	0,80	0,80
		Départementale	3	0,33	1,00	1,00	1,00
		Nationale	4	0,44	N.D.	1,00	1,00
		Autoroute	5	0,56	N.D.	1,00	1,00
		Ligne électrique	6	0,67	N.D.	N.D.	1,00
		Voie ferrée	7	0,78	N.D.	N.D.	N.D.
		Pylône	8	0,89	N.D.	N.D.	N.D.
		Transforma., centrale	9	1,00	N.D.	N.D.	N.D.
	Trafic	Très faible (5)	1	0,20	N.D.	N.D.	N.D.
		Faible (4)	2	0,40	N.D.	N.D.	N.D.
		Standard (3)	3	0,60	N.D.	N.D.	N.D.
		Fort (2)	4	0,80	N.D.	N.D.	N.D.
		Très fort (1)	5	1,00	N.D.	N.D.	N.D.
	Nombre de voies	1 voie	1	0,17	N.D.	N.D.	N.D.
		2 voies (1 direction)	2	0,33	N.D.	N.D.	N.D.
		2 voies (2 direction)	3	0,50	N.D.	N.D.	N.D.
		3 voies (1 direction)	4	0,67	N.D.	N.D.	N.D.
		3 voies (2 direction)	5	0,83	N.D.	N.D.	N.D.
		4 voies ou plus	6	1,00	N.D.	N.D.	N.D.

N.D. : non documenté.

Trois critères d'analyse sont utilisés pour décrire les réseaux de transport et d'énergie. Les réseaux d'énergies sont retenus ainsi que les axes routiers majeurs (*i.e.* voies et autoroutes). Plus le trafic des voies de circulation est important, plus le rang attribué est élevé. Enfin, plus le nombre de voies du réseau routier est élevé (comprenant la direction de ces voies de circulation, sens unique ou double sens), plus l'indice est fort.

3.2.2.3. Affectation des indices aux critères d'analyse structuraux des bâtiments à une échelle locale

À cette échelle locale, l'analyse considère la capacité d'un bâtiment (attribut) à plus ou moins bien résister aux sollicitations apportées par différents processus (*i.e.* processus côtiers, continentaux, etc.). Dans ce contexte, trois situations sont considérées : (1) les inondations (*Fd*), (2) les glissements de terrain (*Ls*) et (3) la concomitance des deux processus sur un même élément (*Me*). Systématiquement, la valeur *Me* retenue est la valeur maximale obtenues pour *Fd* et *Ls*. À cette échelle, la méthode AHP n'est pas considérée, mais les valeurs sont issues de la littérature et réajustées en fonction des connaissances du terrain (Kappes *et al.*, 2012a ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) (Tableau 3.3).

Tableau 3.3. Attribution d'indice selon la capacité de la structure à résister à différents types d'événement à une échelle locale

			Graff et al. (2019a)		*Kappes et al. (2012a)*		*Carlier et al. (2018)*	
EE	**Critère**	**Attribut**	**FS_Fd**	**FS_Ls**	**FS_Fd**	**FS_Ls**	**FS_Fd**	**FS_Ls**
Bâtiment	Matériaux de construction	Pilier (béton)	0,20	0,20	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		Béton	0,40	0,30	0,40	0,30	N.D.	0,8
		Métal	0,30	1,00	0,30	1,00	N.D.	0,4
		Mixte	0,50	0,60	0,50	0,60	N.D.	0,8
		Traditionnel	0,50	0,40	0,50	0,40	N.D.	0,6
		Brique	0,50	0,40	0,50	0,40	N.D.	N.D.
		Bois	1,00	0,90	1,00	0,90	N.D.	1
	Nombre d'étages	1	1,00	0,4	1,00	N.D.	N.D.	0,4
		2	0,50	0,6	0,50	N.D.	N.D.	0,6
		3	0,30	0,6	0,30	N.D.	N.D.	0,6
		4	0,30	0,8	0,30	N.D.	N.D.	0,8
		5	0,30	0,8	0,30	N.D.	N.D.	0,8
		6	0,30	0,8	0,30	N.D.	N.D.	0,8
		> 6	0,30	1	0,30	N.D.	N.D.	1
	Date de construction	<1900	1	1	N.D.	N.D.	N.D.	0,3
		[1900 - 1950]	0,9	0,9	N.D.	N.D.	N.D.	0,5
		]1950 - 1970]	0,7	0,7	N.D.	N.D.	N.D.	0,7
		]1970 - 1990]	0,5	0,5	N.D.	N.D.	N.D.	0,9
		> 1990	0,3	0,3	N.D.	N.D.	N.D.	1
	Etat du bâtiment	Bon	0,30	0,20	0,30	0,20	N.D.	1
		Moyen	0,50	0,50	0,50	0,50	N.D.	0,7
		Mauvais	0,70	0,80	0,70	0,80	N.D.	0,3
		Ruine	1,00	1,00	1,00	1,00	N.D.	0,1
	Type	Autre	0,00	0,00	N.D.	N.D.	N.D.	0,9
		Abri/cabane	0,09	0,09	N.D.	N.D.	N.D.	0,9
		Entrepôt	0,18	0,18	N.D.	N.D.	N.D.	1
		Maison	0,27	0,27	N.D.	N.D.	N.D.	0,9
		Ferme	0,36	0,36	N.D.	N.D.	N.D.	1
		Bâtiment collectif	0,45	0,45	N.D.	N.D.	N.D.	1
		Mixte	0,55	0,55	N.D.	N.D.	N.D.	0,3
		Industrie	0,55	0,55	N.D.	N.D.	N.D.	0,3
		Bureau	0,64	0,64	N.D.	N.D.	N.D.	0,3
		Château	0,73	0,73	N.D.	N.D.	N.D.	1
		Eglise	0,73	0,73	N.D.	N.D.	N.D.	0,1
		Monument	0,73	0,73	N.D.	N.D.	N.D.	0,3
		Tour	0,73	0,73	N.D.	N.D.	N.D.	1
		Centre commercial	0,82	0,82	N.D.	N.D.	N.D.	0,1
		Station	0,91	0,91	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		Complexe	1	1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

N.D. : non documenté, FS_Fd (Factor score flood – capacité de résistance aux inondations), FS_Ls (Factor Score Landslide – capacité de résistance aux glissements de terrain).

Un bâtiment à ossature métallique est plus sujet à être détruit par un glissement de terrain que par une inondation. Les matériaux mixtes comprennent l'alternance de voiles et poteaux en béton et de verre (portes en verre, larges vitrines, etc.) et sont couramment utilisés pour les centres commerciaux et infrastructures de loisirs.

Le nombre d'étages suit une logique double. Pour des inondations, les bâtiments ne comprenant qu'un seul étage (*i.e.* rez-de-chaussée) sont considérés comme « plus sensibles » (note 1) que ceux qui en comprennent deux ou plus, offrant la possibilité aux occupants de se

réfugier dans les niveaux supérieurs pour se mettre à l'abri (note 0.5 à 0.3). À l'inverse, plus un bâtiment a une large emprise au sol, plus la sensibilité aux glissements de terrain sera importante, compte tenu des déformations différentielles préjudiciables attendues.

Le critère « date de construction du bâtiment » est controversé dans la littérature. Dans certains contextes (montagnards), plus la date de construction est ancienne, plus sa capacité à résister à un événement est importante (Mavrouli et Corominas, 2010 ; Kang et Kim, 2016 ; Carlier *et al.*, 2018). À l'inverse, d'autres auteurs considèrent que les bâtiments les plus récents suivent d'avantage les normes de protection et de réglementation face à des phénomènes naturels et sont donc moins sensibles (Arrighi *et al.*, 2018). Au regard des nombreuses prescriptions existantes pour la construction des nouveaux bâtiments, et si celles-ci sont respectées lors des travaux, nous avons considéré que les bâtiments les plus récents pouvaient être statistiquement moins sensibles aux sollicitations (note 0,3 par exemple pour un bâtiment construit après 1990) que les bâtiments plus anciens (note 1). Plus l'état du bâtiment est de qualité, plus l'indice attribué est faible. Enfin, les indices liés au « type » de bâtiment reprennent les valeurs attribuées à l'échelle large.

3.2.3. Mise en place des systèmes de pondération des données

Une fois l'ensemble des valeurs d'indice définit pour chacun des attributs des critères d'analyse, un ou plusieurs systèmes de pondération apportent des nuances sur les valeurs initiales attribuées (Drobne et Lisec, 2009). Ces systèmes de pondération sont étroitement liés aux systèmes de combinaison des données (*cf.* 3.2.4). La forme de ces systèmes peut être soit simple, avec l'utilisation de combinaison linéaire, soit relativement complexe avec l'utilisation de *machine learning* (e.g. réseaux neuronaux) ou de la logique floue (Carver, 1991 ; Drobne et Lisec, 2009 ; Tayyebi *et al.*, 2011 ; Grekousis *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Silva *et al.*, 2017 ; Shah *et al.*, 2017).

Pour des raisons de simplification et de transposition de la méthode, **une méthode de pondération utilisant un système de combinaison linéaire** est appliquée aux différents niveaux de composition des données géographiques (section 3.2.3.1). Au sein des différents modes de pondération, le système de pondération spatial nécessite de spatialiser les secteurs sujets aux inondations et/ou aux glissements de terrain (section 3.2.3.2).

3.2.3.1. Détermination des systèmes de pondération applicables aux différents niveaux des données géographiques

La mise en indice des attributs des critères d'analyse est le premier mode de pondération des données géographiques (Gumus *et al.*, 2016). Cette méthode considère l'utilisation du processus analytique hiérarchique (*Analytic Hierarchy Process* –AHP-), mais d'autres attributions sont envisageables comme l'application d'un coefficient d'endommagement potentiel (*Cep*) dans la méthode PDI (Maquaire *et al.*, 2006 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) (A – Figure 3.4). Cette méthode élabore dans un second temps un coefficient d'intérêt local (*Cil*) afin de nuancer le poids attribué durant la mise en indice (*Cep*). L'utilisation du *Cil* s'inscrit dans les systèmes de pondération attributaire en pondérant l'ensemble des attributs présent au sein d'un même critère d'analyse (B – Figure 3.4). Un poids respectif peut alors être utilisé sur les différents critères utilisés pour faire ressortir les caractéristiques socio-économiques, structurelles, fonctionnelles, etc. (Lissak, 2012).

Le système de pondération des éléments exposés pondère l'ensemble des primitives géométriques de même catégorie (Tsuzuki et Shimada, 2003 ; Nyberg *et al.*, 2018). Par exemple, les bâtiments à l'échelle large (éléments exposés de catégorie A) peuvent être affectés d'une

valeur pondérant l'ensemble des critères et des attributs considérés pour chacun des bâtiments. Une valeur différente peut ensuite être attribuée aux réseaux de transport et d'énergie à cette même échelle (éléments exposés de catégorie B) (C – Figure 3.4). Le système de pondération spatiale considère cette fois un agent extérieur aux éléments exposés initialement considérés et pondère différentes catégories d'éléments exposés comprenant leurs critères ainsi que leurs attributs. Cet agent extérieur peut prendre différentes formes : topographique, distance (ou proximité) à un élément donné (e.g. distance à une rivière ou proximité à une zone de refuge), localisation géographique des éléments exposés, etc. (C – Figure 3.4).

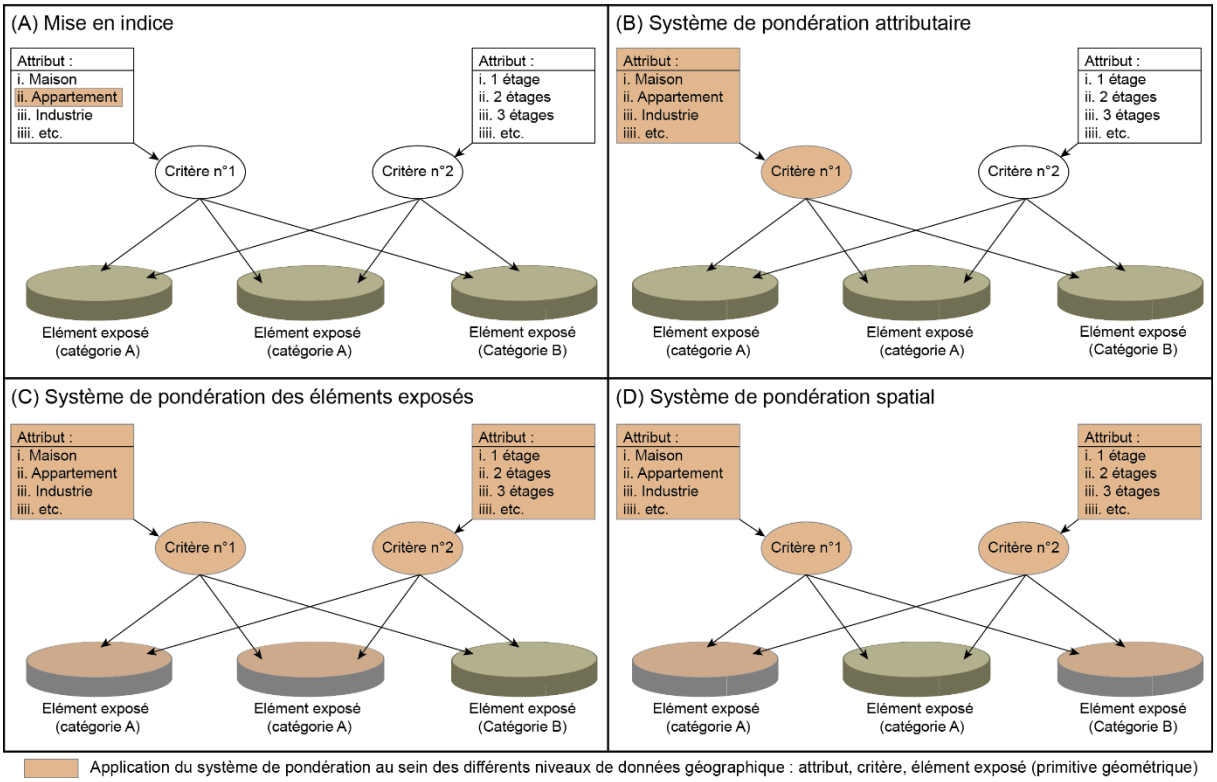


Figure 3.4 : Les modes de pondération possibles aux différents niveaux des données géographiques (attribut, critère, éléments exposés)

Un système de pondération des éléments exposés est utilisé à une échelle d'analyse moyenne et un système de pondération spatial est employé à une échelle d'analyse large et locale. La mise en application du système de pondération des éléments exposés ne nécessite pas de traitements de données au préalable et peut être directement appliquée durant la phase de combinaison des critères. L'application du système de pondération spatiale nécessite la détermination d'un agent extérieur intervenant sur les différentes primitives géométriques et doit donc être réalisée au préalable du système de combinaison. Le système de pondération spatial permet d'inclure ou d'exclure certains éléments du modèle de quantification APC.

3.2.3.2. Spatialisation des secteurs sujets aux inondations et aux glissements de terrain

La détermination d'un agent extérieur pour la mise en place de système de pondération spatial, appliqué ensuite aux échelles d'analyse large et locale, sert à tenir compte de l'environnement direct des éléments exposés (Marzocchi *et al.*, 2012 ; Liu *et al.*, 2016). Dans ce cas, l'agent extérieur doit tenir compte des secteurs potentiellement « sujets à » ou « exposés à » un événement donné. Il ne s'agit pas de disposer de cartes de susceptibilité ou de cartes d'aléa avec définition des niveaux d'intensité et d'occurrence spatiale et temporelle, mais de considérer

une enveloppe assez large dans laquelle peut se produire tel ou tel type d'événement. Trois types de secteurs sont considérés : (1) les secteurs sujets aux inondations par débordement de cours d'eau ou par submersion marine (2) les secteurs sujets aux glissements de terrain et (3) les secteurs sujets à la fois à des inondations et des glissements de terrain (Figure 3.5).

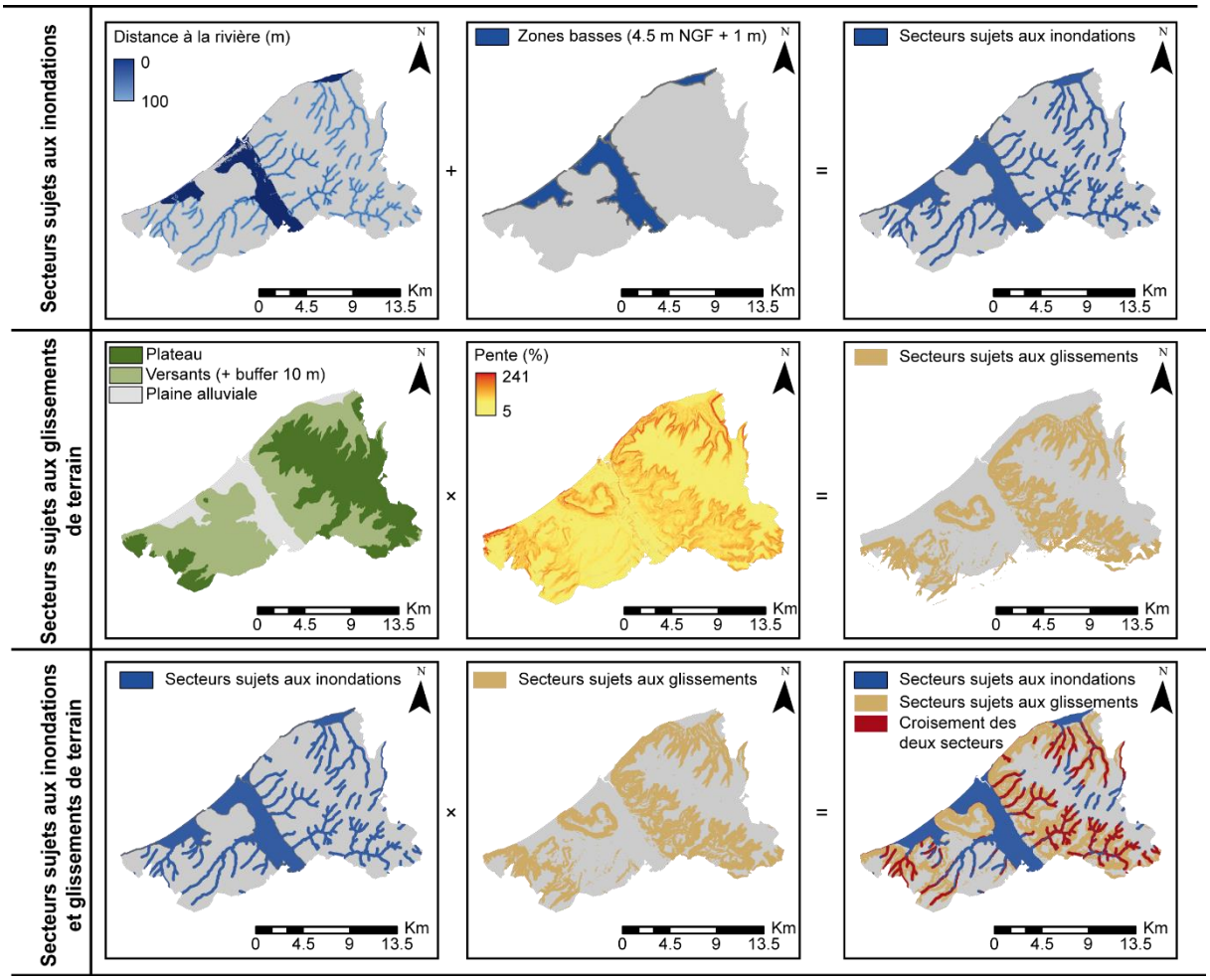


Figure 3.5 : Détermination des trois types de secteurs potentiellement sujets aux inondations, aux glissements de terrain et aux deux phénomènes (Graff *et al.*, 2019a)

Les secteurs sujets aux inondations sont déterminés à partir de deux informations : (1) la distance à la rivière (sur une distance de 0 à 100 m comprenant l'ensemble des drains de la vallée et des sous-bassins) ; (2) les zones basses correspondant aux zones topographiques situées sous un niveau de marin de référence (dans ce cas un niveau marin centennal de 4,5 m NGF + 1 m d'élévation du niveau marin). Le premier agent extérieur (secteurs sujets aux inondations) correspond alors à une simple combinaison de la distance au cours d'eau et des zones basses (Figure 3.6).

Les secteurs sujets aux glissements de terrain sont déterminés à partir : (1) des formes du relief du site d'étude déterminé à partir du *Topographic Position Index* (TPI) pour délimiter les limites entre le plateau, le versant et la plaine alluviale (Deumlich *et al.*, 2010), c'est-à-dire les ruptures de pente (convexité sommitale ou concavité basale) ; (2) pour tenir compte des zones d'ablation et de propagation des glissements de terrain, une bande de 10 m de largeur est également considérée à l'aval et à l'amont du versant. Cette largeur est retenue compte tenu des observations issues des recherches antérieures menées dans le Pays d'Auge (Lissak, 2012 ;

Fressard, 2013) ; (3) de pentes (supérieures à 5 %). Ces informations sont ensuite intersectées pour déterminer les secteurs sujets aux glissements de terrain.

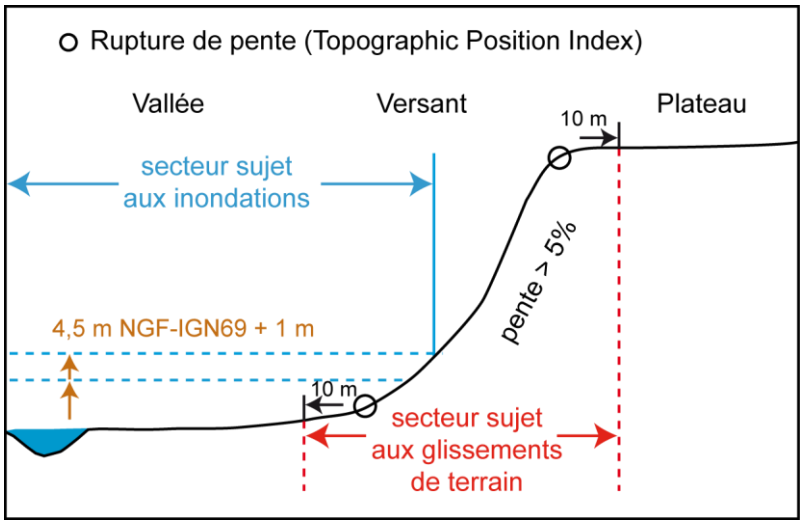


Figure 3.6 : Profil schématique montrant les conditions retenues pour la détermination des trois types de secteurs potentiellement sujets aux inondations, aux glissements de terrain et aux deux phénomènes

Les secteurs sujets à la fois aux inondations et glissements de terrain sont déterminés à partir d'une combinaison (intersection) entre les secteurs potentiellement sujets aux inondations et aux glissements de terrain.

Dans la section suivante (3.2.4), ces trois agents extérieurs sont par la suite intégrés à des systèmes d'arbres de décision pour établir une pondération spatiale des éléments exposés. Ces arbres de décision sont intégrés à la phase de combinaison de critères (étape n°3).

3.2.4. Mode de combinaison des critères et application des systèmes de pondération

La troisième étape de la phase de traitement du modèle de quantification APC est la combinaison des critères et l'application des systèmes de pondération aux différentes échelles spatiales. Différents systèmes de combinaison plus ou moins complexes peuvent être appliqués pour établir cette relation entre les indices et les systèmes de pondération comme les moteurs d'inférence (logique floue), l'utilisation de multiples réseaux de condition (neuronal network) ou plus simplement d'opérateurs mathématiques (Wei et Chen, 2009 ; Castillo Soto, 2012 ; Grekousis *et al.*, 2013 ; Grekousis et Thomas, 2012 ; Lai *et al.*, 2015 ; Nezarat *et al.*, 2015 ; Potter *et al.*, 2016).

Ainsi, cette section est structurée de la manière suivante : des systèmes de combinaison linéaire sont utilisés en raison de leur facilité et rapidité de mise en place et se basent sur le concept de moyennes pondérées dans lequel des critères d'analyse sont combinés et normalisés (Drobne et Lisec, 2009 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) (section 3.2.4.1.) ; des arbres de décision sont élaborés, appliqués dans un environnement SIG et traduits sous la forme d'algorithmes dans un langage Python afin de tenir compte des systèmes de pondération spatiaux (section 3.2.4.2).

3.2.4.1. Les systèmes de combinaison : le lien entre l'attribution d'indice et les systèmes de pondération

Le début de la phase de combinaison commence, pour l'ensemble des types de conséquences considérés aux trois échelles spatiales (conséquences globales, conséquences sur les structures et conséquences sur la structure des bâtiments), par une somme des critères pour obtenir une valeur de conséquences potentielles initiales (P_c) (Drobne et Lisec, 2009 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017) [2]. Durant cette phase, les critères et les éléments exposés sont considérés de façon équivalente.

$$[2]\ P_c = \sum_{i=1}^{n}(c_i)$$

À une échelle moyenne, le calcul des conséquences globales (*OC – Overall Consequences*) se fait à l'échelle d'analyse moyenne par un système de pondération des éléments exposés (C – Figure 3.4). Les conséquences potentielles initiales (P_c) des éléments exposés (*i.e.* surface bâtie, réseaux, zones urbaines, etc.) sont pondérées par une valeur (W_i) attribuée selon l'importance de la catégorie des éléments exposés pour le territoire [3].

$$[3]\ OC = \sum_{i=1}^{n} P_c \cdot W_i$$

À une échelle large, les conséquences sur les infrastructures (*CI – Consequences on Infrastructures*) sont calculées à partir d'un système de pondération spatiale (D – Figure 3.4). Les conséquences potentielles initiales (P_c) sont pondérées selon un système de localisation à plusieurs niveaux retranscrit sous la forme d'un arbre de décision (algorithme – Dt_1) [4].

$$[4]\ CI = P_c \cdot \prod Dt_1$$

À une échelle locale, les conséquences structurelles globales (*SC – Structural Consequences*) sont issues de la combinaison de multiples conséquences structurelles (selon le type d'événement considéré) et d'un second système de localisation à plusieurs niveaux retranscrits également sous la forme d'arbre de décision (algorithme – Dt_2) [5]. Les conséquences potentielles initiales considérées sont les conséquences potentielles aux inondations (*Pc[f]*), les conséquences potentielles aux glissements de terrain (*Pc[l]*) et les conséquences potentielles aux multiples processus (*Pc[m]*).

$$[5]\ SC = \sum_{i=1}^{n} \prod Pc_{(i)} \cdot \prod Dt_2$$

Pour terminer cette phase de combinaison, il s'agit de standardiser les valeurs des conséquences potentielles dans des gammes de valeurs comprises dans un intervalle de [0, 1] (Voogd, 1983 ; Drobne et Lisec, 2009). La transformation des données (X_i) s'opère par la différence entre le score brut (R) d'une valeur i (R_i) et le score brut minimum (R_{min}) compris dans l'intervalle des données considérées puis divisé par la différence entre le R_{max} (score brut maximum) et le R_{min}, le tout étant ensuite multiplié par SR. Le SR (*standardized range*) est l'intervalle de standardisation considéré compris entre 0 et 1 [6].

$$[6]\ X_i = \frac{(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \cdot SR$$

Une fois l'ensemble des données combinées et standardisées, le seuillage des conséquences potentielles est nécessaire pour traduire l'importance des gammes de valeur en degré de conséquence en post-traitement (*i.e.* très fort, fort, moyen, etc.). Différentes méthodes ont été développées pour classer ces valeurs : (1) les méthodes automatiques (e.g. Natural Breaks, intervalles géométriques, Jenks, classification par quantiles, etc.) ; (2) les méthodes empiriques

telles que la classification RCF (Relative Cumulative Frequency) (Tsuzuki et Shimada, 2003 ; Dimakos et Aas, 2004 ; Wei et Chen, 2009 ; Gaspar-Escribano et Iturrioz, 2011 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Lai *et al.*, 2015). Utilisée dans la méthode PDI, la classification RCF détermine des seuils de classes en considérant les distributions de fréquences des données (Puissant *et al.*, 2013 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Fressard *et al.*, 2014 ; Franci *et al.*, 2016). L'avantage de cette classification est de pouvoir ajuster les seuils de valeur des fréquences de distribution de valeurs pour mettre en avant un nombre spécifique d'éléments ou une déterminer une gamme de valeurs traduisant un degré de conséquences selon la vision de l'expert et/ou de l'opérateur.

3.2.4.2. Élaboration des arbres de décision et intégration à la phase de combinaison (pondération spatiale)

Les algorithmes sous forme d'arbres de décision (Dt_1 et Dt_2) pour tenir compte du système de pondération spatial aux échelles large et locale [4] [5] ont été développés à partir de trois principaux opérateurs : *True*, *False* et *While* (Figure 3.7).

(1) L'algorithme commence par une phase de vérification pour savoir si un élément exposé est localisé dans un site sujet à différents types d'événement (inondation ou glissement de terrain). Si la réponse de la condition est vraie (opérateur : *True*) alors l'élément est exclu de l'analyse. Si la réponse de la condition est fausse (opérateur : *False*) alors l'algorithme renvoie l'élément exposé à une deuxième phase ;

(2) La deuxième phase détermine si l'élément exposé est localisé dans une zone sujet à une inondation ou à un glissement de terrain. Durant cette phase, une étape de vérification (opérateur : *While*) est ajoutée afin de préciser si l'élément est localisé dans un site de sujets aux inondations et également aux glissements de terrain (phase n°3) ;

(3) Si la réponse à la phase de vérification de la phase n°3 est fausse (opérateur : *False*), alors l'élément est pondéré par la valeur attribuée en phase n°2. Si la phase de vérification en phase n°3 est vraie, alors l'élément est pondéré par la valeur attribuée en phase n°3.

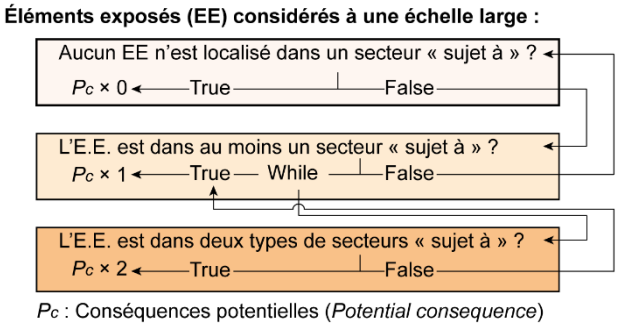
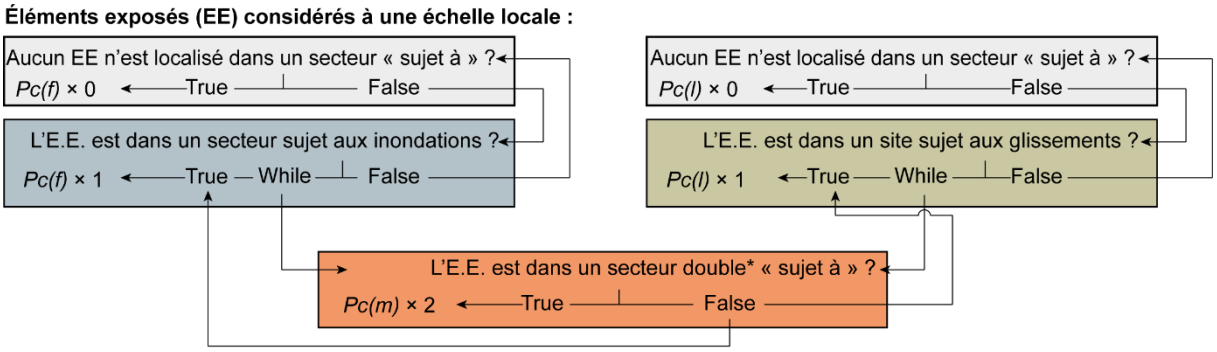


Figure 3.7 : Arbre de décision n°1 (Dt_1) appliqué aux différentes catégories d'éléments exposés et à une échelle large afin de réajuster les valeurs de combinaison initiale (*Pc*) (Graff *et al.*, 2019a)

À une échelle locale, l'algorithme développé considère le type de site sujet aux inondations ou aux glissements de terrain (contrairement à Dt_1) et pondère les différents types de conséquences potentielles en fonction de ces secteurs (Figure 3.8).

Les trois types de conséquences potentielles initiales sont : les conséquences potentielles initiales relatives à des inondations (Pc[f]), les conséquences potentielles initiales relatives à des glissements de terrain (Pc[l]) et des conséquences potentielles relatives aux deux processus (inondations et glissements de terrain) (Pc[m]).



**l'élément exposé est localisé à l'intersection d'un secteur sujet aux inondations et d'un secteur sujet aux glissements de terrain*
Pc(f) : Conséquences potentielles relatives à des inondations (Potential consequences related to flood)
Pc(l) : Conséquences potentielles relatives à des glissements (Potential consequences related to landslide)
Pc(m) : valeur (Pc) maximum entre Pc(f) et Pc(l) (Potential consequences related to multiple events)

Figure 3.8 : Arbre de décision n°2 (Dt_2) appliqué aux différentes catégories d'éléments exposés et à une échelle locale afin de réajuster la valeur de combinaison initiale (Pc[f, l, m]) (Graff *et al.*, 2019a)

Une valeur synthétique (*Overall Consequences*) des conséquences sur la structure des bâtiments est ensuite déterminée en additionnant les valeurs pondérées Pc(f), Pc(l) et Pc(m). Puis, le système de standardisation des valeurs de conséquences réajuste les valeurs finales par une classification RCF dans une gamme comprise entre 0 et 1.

3.2.5. Conclusion

Le modèle de quantification APC développé, en trois phases successives, est constitué d'une *phase de prétraitement*, d'une *phase de traitement* comprenant trois étapes : (1) une attribution des valeurs d'indices, (2) une mise en place des systèmes de pondération et (3) une combinaison des critères d'analyse, et d'une *phase de post-traitement*.

La *phase de prétraitement* peut être relativement longue pour identifier les catégories d'éléments exposés considérés dans l'analyse (*i.e.* surfaces bâties, zones urbaines, bâtiments, réseaux, etc.) et pour déterminer des critères d'analyse cohérents permettant de les caractériser. Le modèle développé détermine ainsi différents éléments exposés et critères à différentes échelles spatiales (moyenne, large et locale).

Durant la *phase de traitement*, la première étape affecte des valeurs d'indices aux attributs des critères d'analyses selon une méthode par analyse hiérarchique (AHP) et en considérant également les valeurs attribuées dans des approches similaires (*i.e.* méthodes orientées « indice »). À la suite de cette attribution de valeurs, différents systèmes de pondération sont élaborés et adaptés aux différentes échelles spatiales. Pour la deuxième étape, un système de pondération des éléments exposés à une échelle permet de considérer l'ensemble des éléments présents sur un territoire d'étude en mettant en avant les composantes les plus importantes. *À une échelle large et locale*, un système de pondération spatiale est préféré pour exclure ou inclure certains éléments exposés en fonction de leur situation spatiale. Dans ce cas, les secteurs sujets aux inondations, glissements de terrain et à ces deux processus sont déterminés et intégrés avec deux algorithmes prenant la forme d'arbre de décision dans une plateforme SIG. La troisième étape combine l'ensemble des critères d'analyses en considérant les différents systèmes de pondération pour obtenir : (1) les conséquences globales à une échelle moyenne,

(2) les conséquences sur les infrastructures à une échelle large et (3) les conséquences sur la structure des bâtiments à une échelle locale.

La phase de post-traitement discrétise et représente les résultats obtenus par le modèle de quantification APC. À une échelle moyenne, une représentation 2D des primitives géométriques est préférée. Aux échelles large et locale, plusieurs modes de représentation sont possibles et l'une des plus efficaces, en terme de visualisation, est la représentation 2,5D ou 3D selon les ressources matérielles disponibles (puissance des processeurs, cartes graphiques, etc.).

3.3. Analyse du modèle de quantification APC

Le modèle de quantification APC (Affectation, Pondération, Combinaison) élaboré a été testé sur le site d'étude n°1 (Houlgate – Honfleur). Rappelons brièvement qu'à partir de la compilation et l'harmonisation des bases de données (modèle MSA et LSA), les critères d'analyse des éléments exposés sont affectés d'un indice, issus d'un jugement expert, puis sont pondérés grâce à deux systèmes de pondération : (1) un système de pondération des éléments exposés et (2) un système de pondération spatial qui combine linéairement l'ensemble des critères d'analyse. À la suite de ce modèle (phase de post-traitement), les résultats sont standardisés et discrétisés. L'affichage des résultats est à adapter aux différentes échelles d'analyses spatiales.

Ainsi, les résultats des conséquences potentielles obtenus par affectation, pondération et combinaison sont d'abord présentés pour les trois échelles (moyenne, large et locale) retenues (section 3.3.1). Puis, le modèle est discuté à travers une analyse des avantages et des incertitudes et est complété par une analyse des moyens d'intégration des résultats (indice) à une analyse multirisque comprenant les différentes modalités de transposition (section 3.3.2).

3.3.1. Résultats du modèle obtenus aux trois échelles spatiales

À partir des différents indices définis, des différents systèmes de pondération (élément exposé et spatial) couplés à une combinaison linéaire des critères, les conséquences potentielles sont présentées successivement ci-après pour chacune des trois échelles spatiales : les conséquences globales à une échelle moyenne (section 3.3.1.1), les conséquences sur les infrastructures à une échelle large et les conséquences sur la structure des bâtiments à une échelle locale (section 3.3.1.3).

3.3.1.1. Conséquences globales à une échelle moyenne (1 : 100 00e – 1 : 25 000)

À cette échelle moyenne, les conséquences globales (*OC*) sont calculées à partir de la somme des différents types d'éléments exposés (Figure 3.9) : (a1) les surfaces bâties, (a2) les réseaux de transports et d'énergie, (a3) les zones urbaines, et (a4) les surfaces agricoles et naturelles. Les résultats obtenus sont standardisés par une méthode RCF, sur une échelle de [0, 1], et discrétisés en quatre classes de conséquences potentielles.

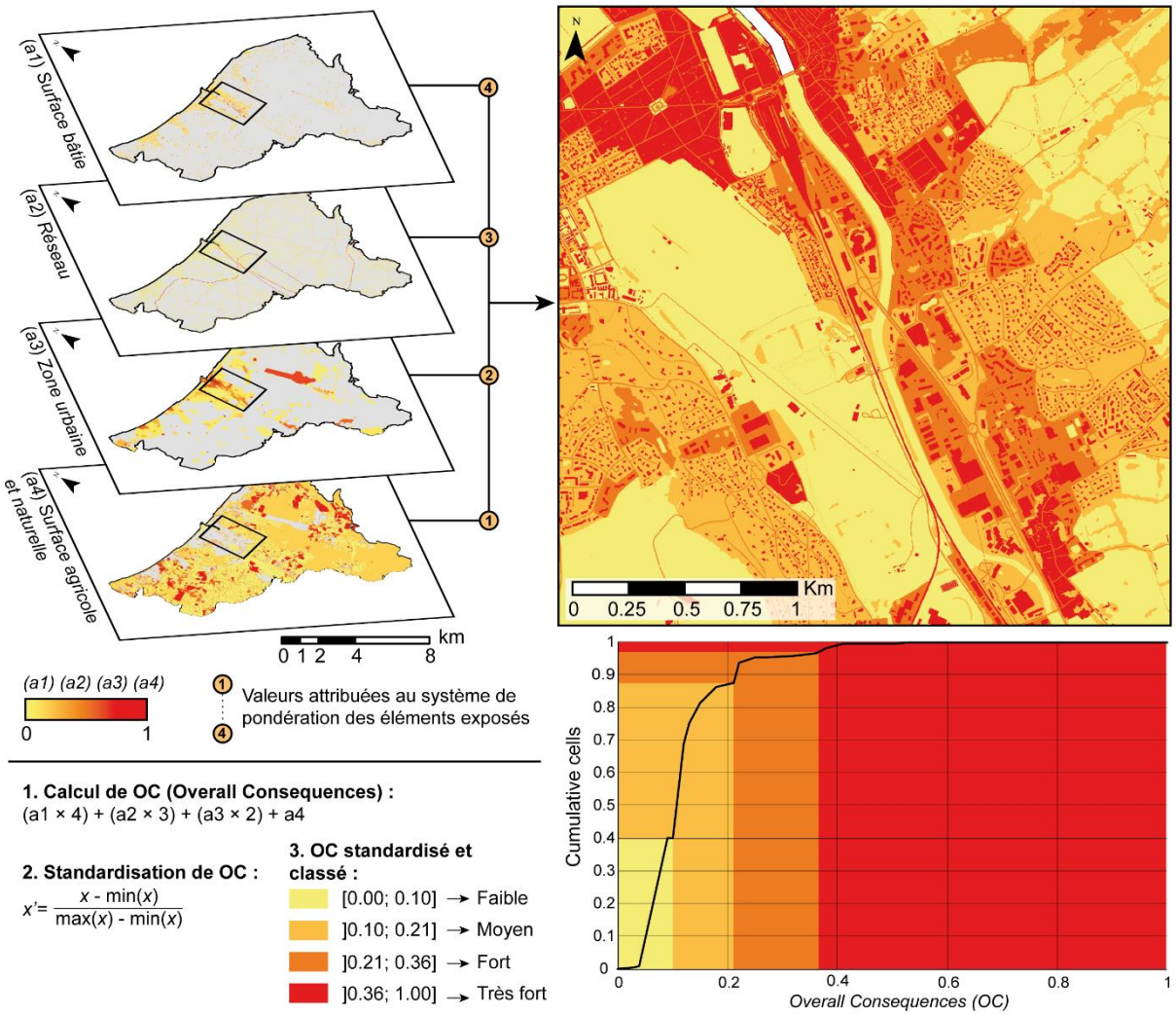


Figure 3.9 : Quantification et spatialisation des conséquences globales (OC) à une échelle moyenne (1 : 100 000 – 1 : 25 000) sur l'ensemble du territoire n°1 et zoom sur une vignette calée de part et d'autre de la vallée de la Touques (Graff *et al.*, 2019a)

Les conséquences potentielles très fortes (3 % de la superficie totale du site d'étude n°1) mettent en avant six éléments : (1) l'ensemble des surfaces bâties, (2) les autoroutes, (3) les routes nationales, (4) les réseaux de transport ferrés, (5) l'ensemble du réseau énergétique et (6) les centres urbains (activité résidentielle et économique).

Ainsi, sur l'ensemble du territoire n°1, les secteurs présentant des *conséquences potentielles fortes à très fortes* (9 % de la superficie totale) correspondent aux : (1) zones d'activités économiques (industrielles, commerciales, publics), (2) zones résidentielles collectives, (3) terres arables (zones de grandes cultures de blé tendre, maïs, etc.) ainsi qu'aux (4) routes départementales.

Les *conséquences potentielles moyennes* (48 % de la superficie totale) représentent : (1) les zones résidentielles pavillonnaires, (2) les zones protégées d'intérêt écologique (ZNIEFF de type I et II, Natura 2000), (3) les sites touristiques et de loisirs (parcs, jardins communaux, plages équipées, golfs, etc.) et (4) les routes communales.

Les *conséquences potentielles faibles* (40 % de la superficie totale) concernent les zones à urbaniser (15 et 30 ans), les chemins (de randonnée, escalier, viabilisé, etc.), les surfaces en

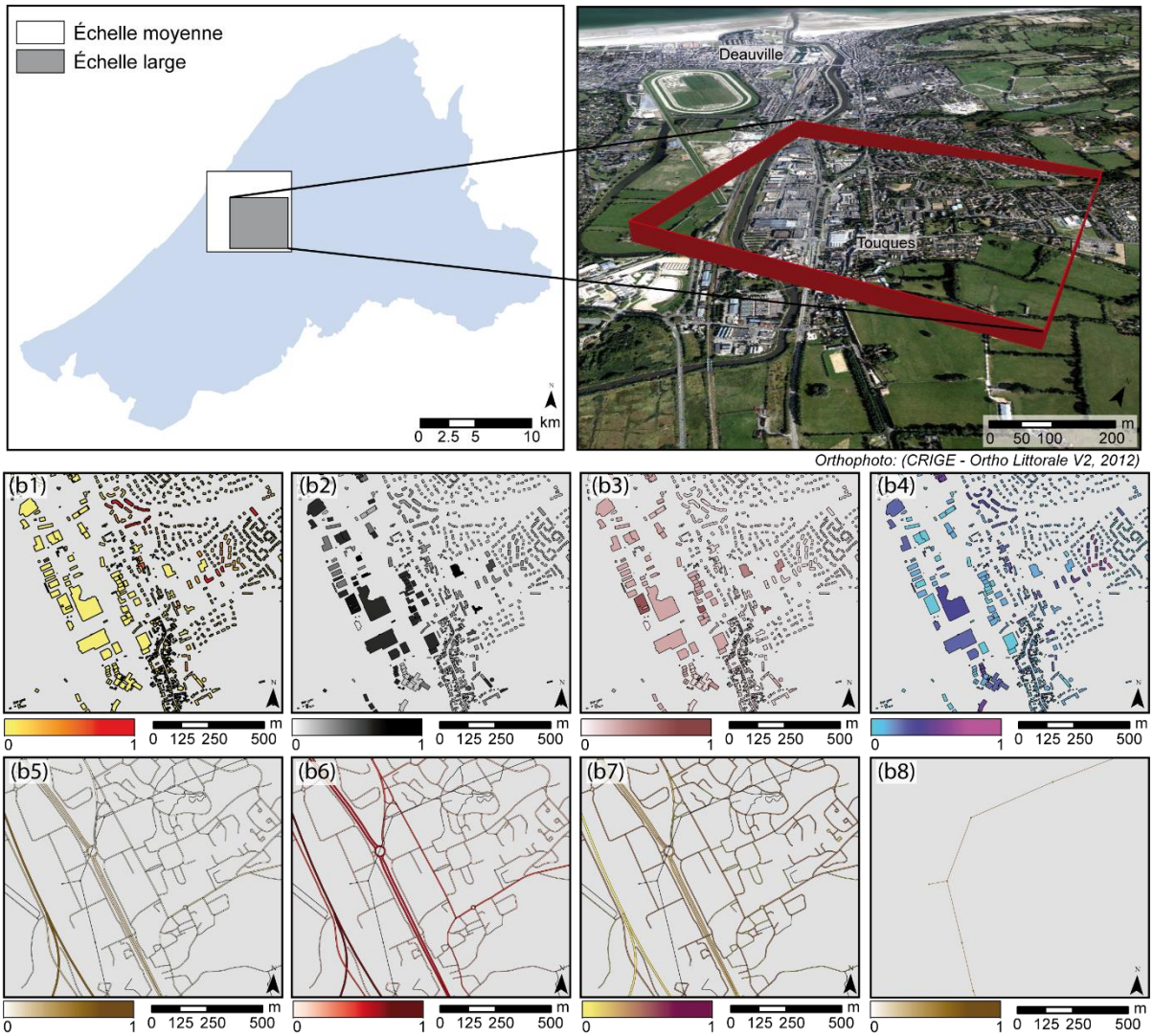
herbe, les broussailles, les bois et forêts non répertoriés en zones d'intérêt écologique, les surfaces en eau (étangs, rivières, réservoir, etc.), les surfaces agricoles en gel (sans utilisation) et autres surfaces naturelles.

3.3.1.2. Conséquences sur les infrastructures à une échelle large (1 : 25 000 – 1 : 10 000)

À une échelle d'analyse large, les conséquences sur les infrastructures (*IC*) ont été obtenues à partir des conséquences fonctionnelles, corporelles et structurelles. Ces trois types de conséquences sont calculés grâce à sept critères d'analyse différents (population estimée, type, fonction, nombre de voies, etc.) déterminés pour les bâtiments, les réseaux de transport et les systèmes d'énergie. La somme des critères « type », « fonction », « nombre d'étages » et « population estimée » est réalisée sur plus de 31 000 bâtiments. La somme des critères « type », « nombre de voies » et « trafic » est réalisée sur un total de 1 200 km de linéaire routier. Le réseau d'énergie concerne 35 km de linéaire comprenant les lignes électriques, antennes et pylônes (Figure 3.10).

Une fois l'ensemble des critères identifiés et combinés, les valeurs sont réajustées grâce à une pondération spatiale issue de l'arbre de décision (Dt_1). Cet arbre de décision intègre l'environnement (*i.e.* les secteurs sujets à divers processus) dans la quantification et l'analyse des conséquences potentielles en excluant les éléments exposés en dehors des secteurs identifiés et en augmentant le score localisé à l'intérieur (Figure 3.11).

Pour les conséquences sur les infrastructures liées aux bâtiments : sur les 31 251 bâtiments identifiés de l'ensemble du territoire n°1, 9 967 (32 %) sont localisés en dehors des secteurs sujets aux processus retenus (inondations et glissements de terrain). Des *conséquences potentielles faibles* sont obtenues sur 12 140 bâtiments (39 %) et concernent principalement tous les abris, entrepôts et résidences pavillonnaires secondaires (sans population estimée) d'un étage localisés dans un site soumis à des inondations ou à des glissements de terrain. Des *conséquences potentielles moyennes* sont obtenues sur 6 080 bâtiments (19 %) et concernent les bâtiments collectifs (résidentiels) avec au moins trois étages et un indice de population estimé inférieur à 0,5 (mixte entre résidences principales et secondaires) sur les sites soumis à au moins un processus. Les conséquences potentielles fortes sont calculées sur 2 458 bâtiments (8 %) et concernent essentiellement les bâtiments et complexes commerciaux, industriels ou administratifs composés de plus de trois étages et localisés dans un site soumis à l'un des processus retenus. Des *conséquences potentielles très fortes* concernent 605 bâtiments (2 %) et n'importe quel type de pavillon, bâtiments collectifs ou complexe localisé dans une zone soumise aux deux processus (inondations et glissements de terrain). Cela concerne également tous les centres de secours et de soins localisés dans les secteurs soumis à au moins un processus (correspondant à des zones inondables et/ou à des versants instables).

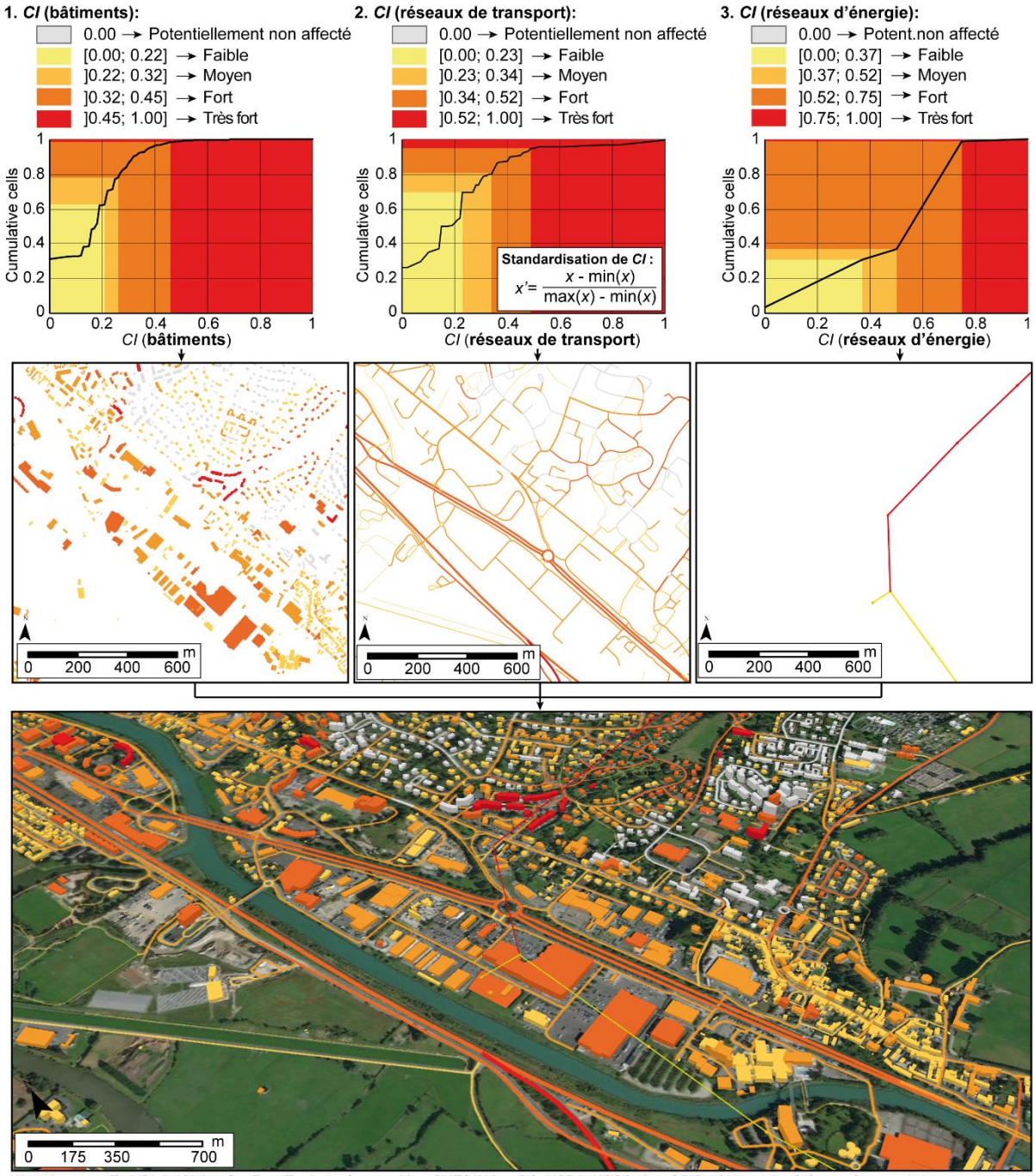


(b1) Indice de la population estimée par bâtiment, (b2) indice du type de bâtiment, (b3) indice de la fonction des bâtiments, (b4) indice du nombre d'étage par bâtiment, (b5) indice du type de réseaux de transport, (b6) indice du trafic, (b7) indice du nombre de voies (réseaux de transport), (b8) indice du type de réseaux énergétique.

Figure 3.10 : Critères utilisés pour la quantification des conséquences sur les infrastructures (*CI*) illustrés sur une vignette calée de part et d'autre de la vallée de la Touques du territoire n°1 (Graff *et al.,* 2019a)

Pour les conséquences sur les infrastructures liées aux réseaux de transport : parmi les 1 201,3 km de réseaux de transport, 324,4 km (27 %) sont localisés en dehors des secteurs sujets à des processus d'inondation ou de glissement de terrain. Les *conséquences potentielles faibles* sont calculées sur 516,6 km (43 %) et comprennent tous les types de chemins et de routes avec une ou deux voies (direction directe ou double), un indice de trafic inférieur ou égal à 0,2, localisé dans au moins un secteur sujet à un processus. Les *conséquences potentielles moyennes* sont calculées sur 120,1 km (10 %) et concerne les routes départementales ou communales avec deux voies (double direction), une valeur d'indice du trafic supérieur ou égal à 0,5, localisé sur un secteur soumis à un type de processus. Les *conséquences potentielles fortes* sont calculées sur 192,2 km (16%) et concernent les routes départementales et communales localisées dans des secteurs exposés à de multiples processus (inondation et glissement de terrain) ou les autoroutes localisées sur les secteurs soumis à un type de processus. Les *très fortes conséquences potentielles* sont calculées sur 108,1 km (9 %) et concernent les voies ferrées ou

les routes nationales et départementales, avec un indice de trafic supérieur ou égal à 0,8, localisé dans des secteurs soumis à de multiples processus.



Les conséquences sur les infrastructures (CI) représentées sont pondérées selon le niveau d'exposition de l'élément à risque (EaR) à travers un arbre de décision dans un environnement SIG.

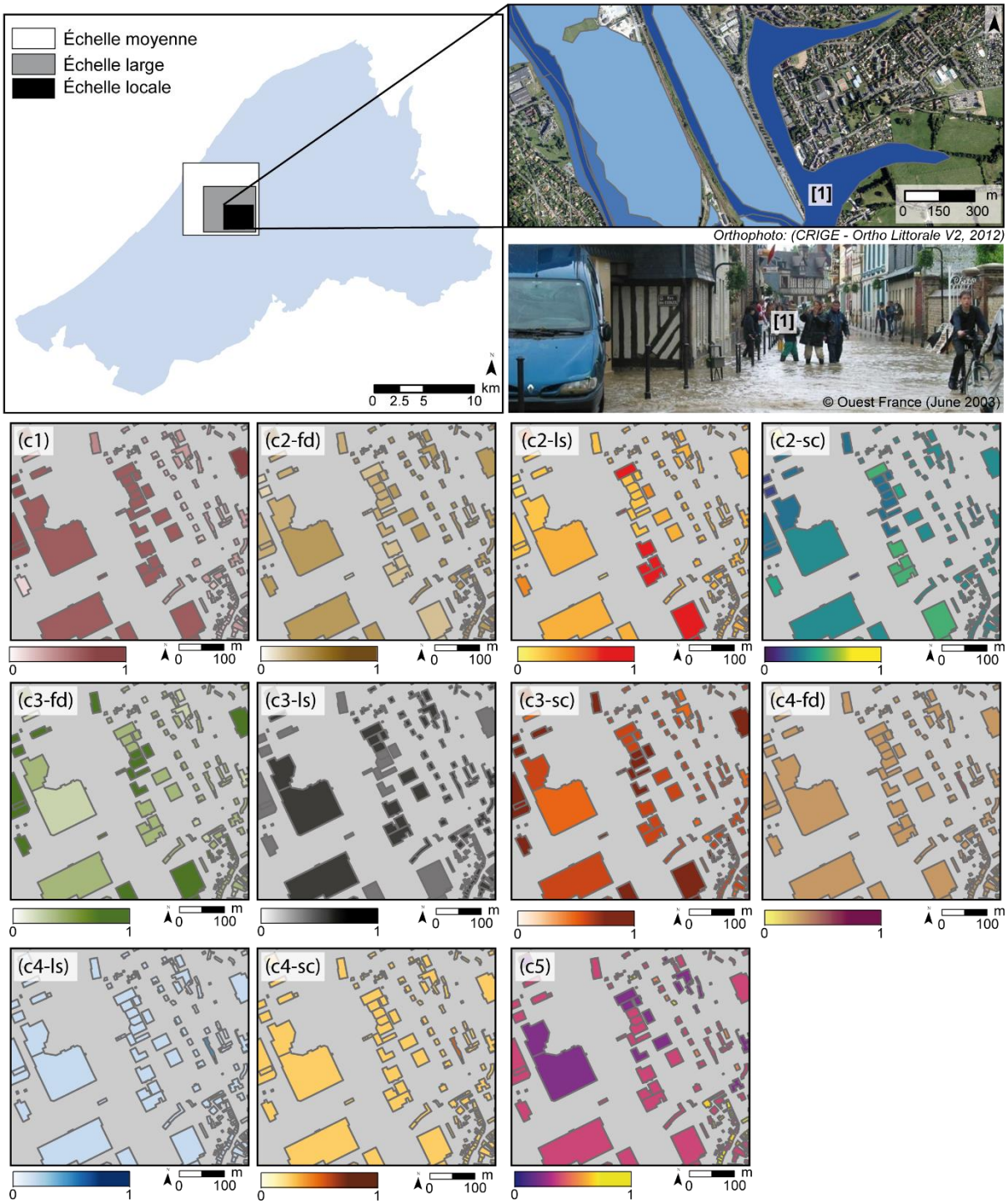
Figure 3.11 : Calcul des conséquences infrastructurelles (*CI*) à une échelle large (1 : 25 000 – 1 : 10 000) réajusté en fonction du système de pondération (*Dt1*). Illustration sur une vignette calée de part et d'autre de la vallée de la Touques du territoire n°1 (Graff *et al.*, 2019a)

Pour les conséquences sur les infrastructures liées aux réseaux énergétiques : sur les 35,2 km de réseaux énergétiques identifiés, 700 m (2 %) sont localisés en dehors des secteurs sujets aux processus (inondation et glissements de terrain). Les *conséquences potentielles faibles* concernent 9,9 km (28 %) avec des lignes électriques localisées sur un secteur soumis à au moins un des processus (inondation ou glissement de terrain). Les *conséquences potentielles moyennes* sont obtenues sur 2,1 km (6 %) et concernent les pylônes localisés sur un secteur soumis à l'un des types de processus considéré. Les *conséquences potentielles fortes* concernent 22,2 km (63 %) de lignes électriques et les *conséquences potentielles très fortes* sont liés à des pylônes présents sur un linéaire de 400 m (1 %) localisés dans des secteurs soumis à une exposition multiple (inondation et glissement de terrain).

3.3.1.3. Conséquences sur la structure des bâtiments à une échelle locale (1 : 10.000 – 1 : 2000)

À cette échelle locale, les conséquences potentielles sur la structure des bâtiments (*SC*) sont calculées à partir de la somme des conséquences potentielles relatives aux inondations [SC(f)], aux glissements de terrain [SC(l)] et aux deux processus concomitants [SC(m)]. Rappelons tout de même, ce qui a été détaillé précédemment, à savoir qu'un total de cinq critères d'analyses spécifiques à la structure des bâtiments sont utilisés à cette échelle, contre deux critères d'analyse à une échelle large : (1) le type de bâtiment (*i.e.* pavillon, bâtiments collectifs, complexe, etc.), (2) les matériaux de construction, (3) l'état du bâtiment, (4) le nombre d'étages et (5) la date de construction (Kappes *et al.*, 2012a ; van Westen *et al.*, 2014 ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2016). L'indice attribué détermine la capacité du critère d'analyse (et de l'élément exposé) à résister à différents processus (*i.e.* inondations, glissements de terrain). Les données sont issues du modèle LSA provenant de bases de données de différentes sources, de photo-interprétation et d'acquisition sur le terrain.

Le modèle a été appliqué sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville (Figure 3.12) correspondant à un polygone de 1 km par 1,3 km soit une emprise de 1,3 km^2 ; polygone dans lequel 861 bâtiments (primitives géométriques issues du RGE®, *cf.* chapitre 2) sont identifiés et localisés. Ce secteur a la particularité d'être affecté à la fois par des glissements et par des inondations (lentes ou rapides) (Delahaye, 2003 ; Douvinet, 2006 ; Douvinet *et al.*, 2009, 2015). Le dernier événement majeur date du 1er juin 2003 sur la commune de Touques où d'importantes crues turbides se sont produites entraînant une victime et générant 5,3 millions de dégâts et ont provoqué une réactivation de certains glissements (Fressard *et al.*, 2014 ; Lissak *et al.*, 2014).



[1] Emprise spatiale et illustration photographique des crues turbides du 1er juin 2003 sur la commune de Touques qui ont généré un mort et 5,3 millions de dégâts, (c1) indice du type de bâtiment, (c2) indice des matériaux de construction relatif (fd) aux inondations, (ls) aux glissements de terrain, (sc) à une multiple exposition, (c3) indice du nombre d'étages relatif (fd) aux inondations, (ls) aux glissements de terrain, (sc) à une multiple exposition, (c4) indice de l'état des bâtiments relatif (fd) aux inondations, (ls) aux glissements de terrain, (sc) à une multiple exposition, (c5) indice de la date de construction des bâtiments.

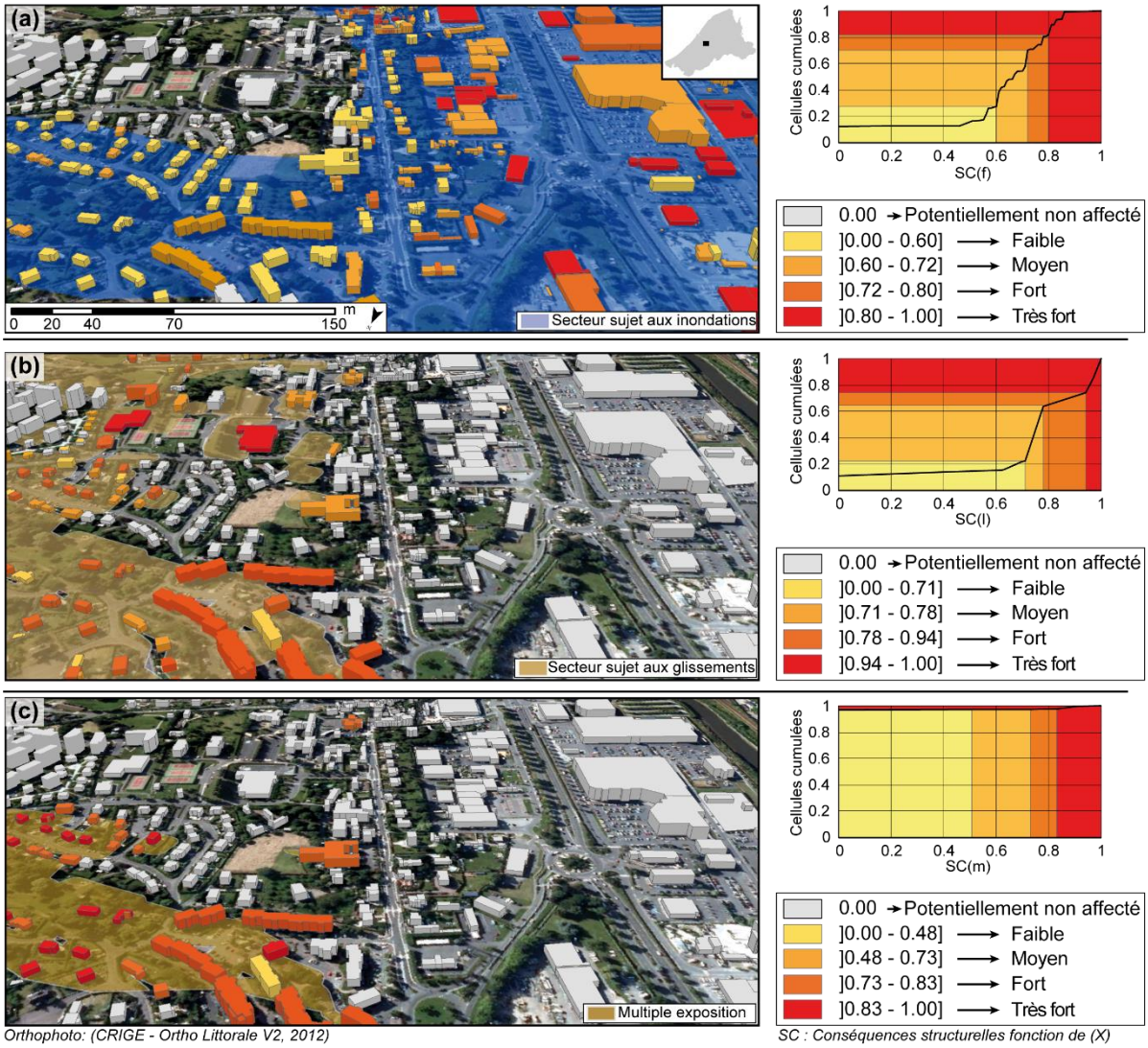
Figure 3.12 : Ensemble des critères utilisés pour la quantification des conséquences sur la structure des bâtiments (SC) et illustrés sur un zoom d'un secteur localisé sur la commune de Touques (Graff *et al.*, 2019a)

Pour chacune des conséquences sur la structure des bâtiments liées aux inondations, aux glissements de terrain, ou bien aux deux processus à la fois, les critères spécifiques à chacun des processus sont combinés de la façon suivant : c1 + c2 – fd + c3 – fd + c4 – fd + c5, puis c1 + c2 – ls + c3 – ls + etc. Le système de pondération spatial Dt_2 réajuste les valeurs des critères d'analyse attribuées en fonction de la localisation des éléments exposés et comprend dans ce cas les secteurs sujets à des inondations, à des glissements de terrain et à de multiples processus (Figure 3.13).

Les **conséquences sur la structure des bâtiments liées aux inondations** [FC(f)], concernent 739 bâtiments soit 86 % du total. Les *conséquences potentielles faibles* concernent 301 bâtiments (35 %) représentés par des pavillons en matériaux traditionnels construits après 1990, en bon état, et possédant au moins deux étages. Les *conséquences potentielles moyennes* sont obtenues sur 186 bâtiments (22 %) et concernent les pavillons ou bâtiments collectifs avec deux ou trois étages, en matériaux traditionnels ou en béton, construits entre 1950 et 1970 avec un état entre moyen et bon. Les *conséquences potentielles fortes* concernent 99 bâtiments (11 %) correspondant à des complexes, entrepôts, centres commerciaux et industries en matériaux mixtes (béton et verre) avec deux étages ou plus. Elles concernent également les pavillons avec un étage édifiés avant 1970, en état moyen ou en bon état construit en matériaux traditionnels. Les *très fortes conséquences potentielles* concernent 88 bâtiments (10 %) correspondant aux bâtiments en mauvais état, aux stations-services ainsi qu'aux complexes commerciaux et industriels avec un seul étage et construits en matériaux mixtes.

Les conséquences sur la structure des bâtiments liées aux glissements de terrain [FC(l)] concernent seulement 102 bâtiments soit 12 % du total. Les *conséquences potentielles faibles* concernent 13 bâtiments (1,5 %) comme les pavillons avec un ou deux étages, en bon état, construits, après 1990, en matériaux traditionnels, mais également les abris et cabanes. Les *conséquences potentielles moyennes* concernent six bâtiments (0,7 %) correspondant à des bâtiments résidentiels, de deux ou trois étages, dans un état bon à moyen et construits en matériaux traditionnels ou en béton, entre les années 1980 et 1990. Les *conséquences potentielles fortes* sont calculées sur 18 bâtiments (2 %) et concernent les pavillons et bâtiments collectifs avec trois étages ou plus, en matériaux traditionnels ou en béton, construits avant les années 1980. Les *très fortes conséquences potentielles* sont calculées sur 30 bâtiments (3 %) et concernent les monuments, les complexes et bâtiments résidentiels collectifs avec trois étages en matériaux traditionnels, en moyen ou bon état, construits avant 1980. Elles concernent également l'ensemble des bâtiments en mauvais état.

Les conséquences sur la structure des bâtiments liées aux deux processus (inondations et glissements de terrain) [SC(m)] concernent 751 bâtiments (87 %). Les *conséquences potentielles faibles* sont calculées sur 151 bâtiments (8 %) et concernent les abris et pavillons construits après 1990, en matériaux traditionnels (bon état), avec deux étages. Les *conséquences potentielles moyennes* concernent 338 bâtiments (39 %) représentées par des pavillons à deux étages, en matériaux traditionnels dans un état bon à moyen et construits avant les années 1970 et 1990. Les *fortes conséquences potentielles* sont calculées sur 172 bâtiments (20 %) et concernent les pavillons avec deux ou trois étages, en béton ou matériaux traditionnels, dans un état moyen à bon et construits avant les années 1970. Les *très fortes conséquences* potentielles sont calculées sur 90 bâtiments (10 %) et concernent les pavillons et bâtiments collectifs résidentiels avec trois étages ou plus, construits entre les années 1970 et 1990 en matériaux traditionnels ou en béton (état mauvais à bon).



(a) Conséquences relatives aux inondations [SC(f)], (b) conséquences relatives aux glissements de terrain [SC(l)], (c) conséquences relatives à la concomitance des deux processus [SC(m)].

Figure 3.13 : Calcul des conséquences sur la structure des bâtiments (*SC*) à une échelle locale (1 : 10 000 – 1 : 2 000) réajusté en fonction du système de pondération (Dt_2). Illustration sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville (Graff *et al.*, 2019a)

La somme des différents types de conséquences sur la structure des bâtiments [SC(f)], [SC(l)] et [SC(m)], fournit une information synthétique des conséquences potentielles à une échelle locale en considérant la localisation des éléments exposés (Figure 3.14) en secteurs potentiellement inondables (débordement de cours d'eau ou de vallon sec et submersion marine) et instables (versant affecté par des glissements de terrain).

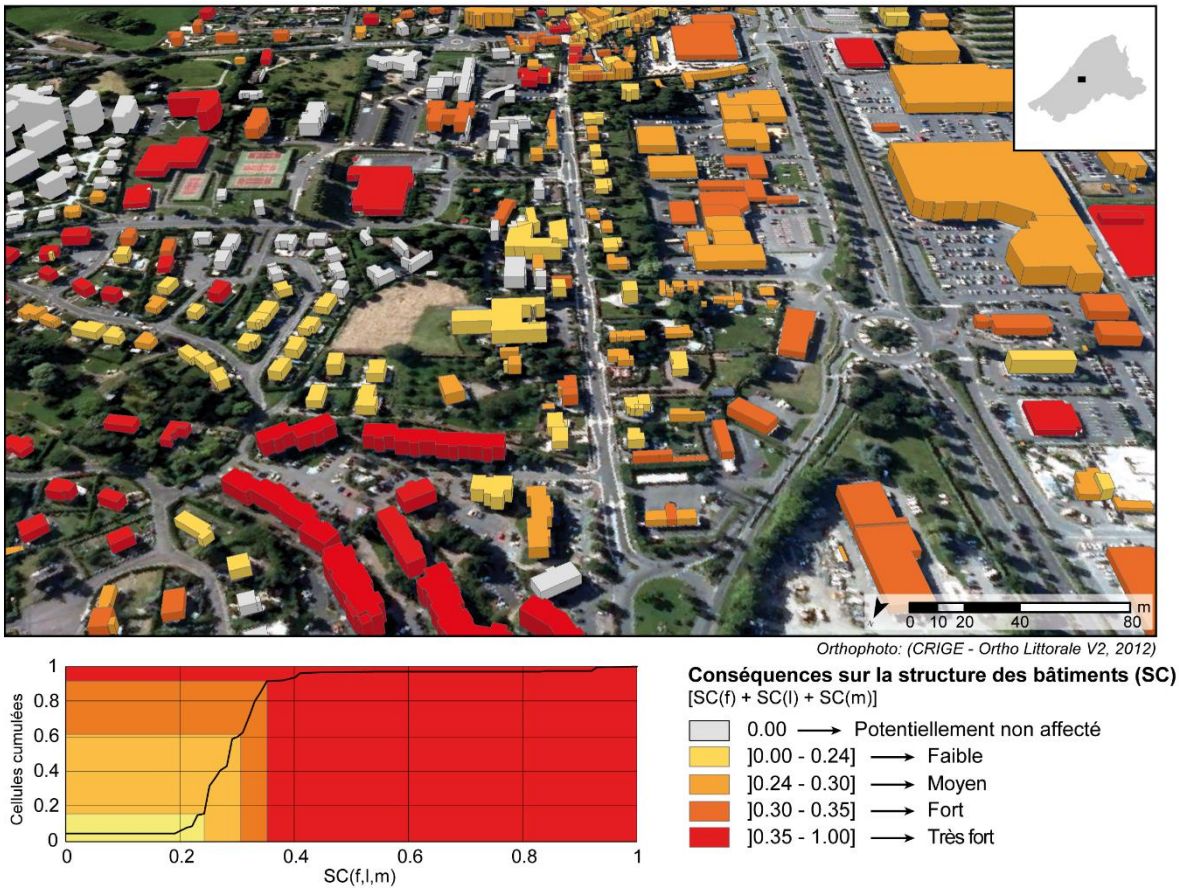


Figure 3.14 : Conséquences sur la structure des bâtiments (*SC*) à une échelle locale par la combinaison des SC(f), SC(l) et SC(m). Illustration sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville (Graff *et al.*, 2019a)

En considérant **la somme des conséquences potentielles sur la structure des bâtiments,** 51 bâtiments (5,9 %) ne sont pas localisés sur des secteurs sujets à des inondations, des glissements de terrain ou aux deux processus concomitants. Les *conséquences potentielles faibles* sont calculées sur 98 bâtiments (11,4 %) et concernent les bâtiments avec deux étages, construits entre les années 1970 et 1990, en matériaux traditionnels (bon état) et localisés sur au moins un secteur sujet à l'un des processus. Les *conséquences potentielles moyennes* sont calculées sur 371 bâtiments (43 %) et concernent les complexes, les centres commerciaux et industries avec deux étages ou plus, en matériaux mixtes (béton et verre) ou traditionnels (bon état), construits après les années 1990 et localisés sur au moins un secteur sujet à un type de processus. Elles concernent également les abris et pavillons avec un ou deux étages, en matériaux traditionnels ou briques (état moyen à bon) construits avant les années 1970. Les *fortes conséquences potentielles* sont calculées sur 269 bâtiments (31 %) et concernent les complexes, centres commerciaux et industries possédant un étage, en matériaux mixtes (béton et verre), en bon état et construits entre les années 1970 et 1990 localisés sur un secteur sujet à l'un des processus. Elles concernent également les entrepôts d'un étage (état mauvais à bon) et les bâtiments résidentiels avec deux étages construits en matériaux traditionnels (bon état) avant les années 1970. Les *très fortes conséquences potentielles* (9,7 %) concernent 72 bâtiments construits sur des secteurs soumis aux deux processus concomitants.

3.3.2. Intérêts et limites de la quantification des conséquences potentielles par une approche multiscalaire

Le modèle de quantification APC (Affectation, Pondération, Combinaison) permet une analyse des conséquences potentielles à plusieurs échelles spatiales et pour différents types de conséquences (global, corporel, fonctionnel, structurel, …). Les systèmes de pondération (spatiaux ou des éléments exposés) sont intégrés au modèle pour considérer soit l'importance des éléments exposés pour le territoire d'étude, soit pour considérer l'environnement direct de ces éléments. Le modèle APC a été développé sur la base de méthodes orientées « indices » telles que la méthode PDI (*Potential Damage Index*) et RVI (*Relative Vulnerability Index*) pour différentes échelles spatiales (Maquaire *et al.*, 2004 ; Malet *et al.*, 2006 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2007 ; Kappes *et al.*, 2012a ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; van Westen *et al.*, 2014 ; Carlier *et al.*, 2018).

Cette section présente successivement : une analyse des avantages de la méthode APC (section 3.3.2.1), les limites et incertitudes du modèle APC (section 3.3.2.2.), les conditions de transposabilité ou de reproductibilité de la méthode (section 3.3.2.3) et des axes de développements futurs du modèle (section 3.3.2.4).

3.3.2.1. Avantages de la méthode APC

Un des points fondamentaux du modèle APC est de proposer une analyse des conséquences potentielles à plusieurs échelles spatiales en liant ces échelles à travers des primitives géométriques communes ou des critères d'analyse communs. Une attention particulière a été accordée à la cohérence de la précision spatiale des éléments exposés à ces échelles ainsi qu'aux critères d'analyse considérés. *A l'échelle moyenne* (1 : 100 000 – 1 : 25 000), les conséquences potentielles globales (*Overall consequences*) sont obtenues sur l'ensemble des éléments exposés en considérant exclusivement le type d'occupation et d'usage des sols (Kappes *et al.*, 2011 ; Cascini *et al.*, 2013 ; van Westen *et al.*, 2014). L'évaluation de ces conséquences potentielles peut permettre d'identifier sur un territoire les potentiels secteurs à très forts enjeux *(hotspots)* et donc à très fortes conséquences potentielles. *L'échelle large* (1 : 25 000 – 1 : 10 000) complète cette information en considérant les conséquences corporelles, fonctionnelles et structurelles sur les bâtiments ainsi que sur les réseaux de transport et d'énergie (Maquaire *et al.*, 2004 ; Malet *et al.*, 2006 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; van Westen *et al.*, 2014 ; Carlier *et al.*, 2018). À cette échelle large, le système de pondération spatiale opère un tri des éléments exposés en considérant leur environnement direct (les secteurs « sujets à » inondations, glissements de terrain, etc.). *L'échelle locale* (1 : 10 000 – 1 : 2 000) fait le lien avec les analyses de conséquences sur la structure des bâtiments en attribuant des valeurs d'indices fonction de la capacité des éléments exposés à résister aux sollicitations des différents phénomènes (processus) considérés (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007 ; Kappes *et al.*, 2012a ; van Westen *et al.*, 2014).

Ces trois échelles spatiales sont donc complémentaires, car elles apportent chacune un niveau de résolution ainsi qu'un degré d'information adapté à différents objectifs (Figure 3.15). À une échelle moyenne, les conséquences globales apportent une première estimation des *hotspots* sur le territoire, mais la résolution est insuffisante pour distinguer les infrastructures. Cette information est donc complétée par l'analyse des infrastructures à une échelle large. À l'échelle locale, il est possible de mieux distinguer les conséquences potentielles sur la structure des différents bâtiments, et de mieux les différencier les uns des autres selon la classe de conséquences considérée.

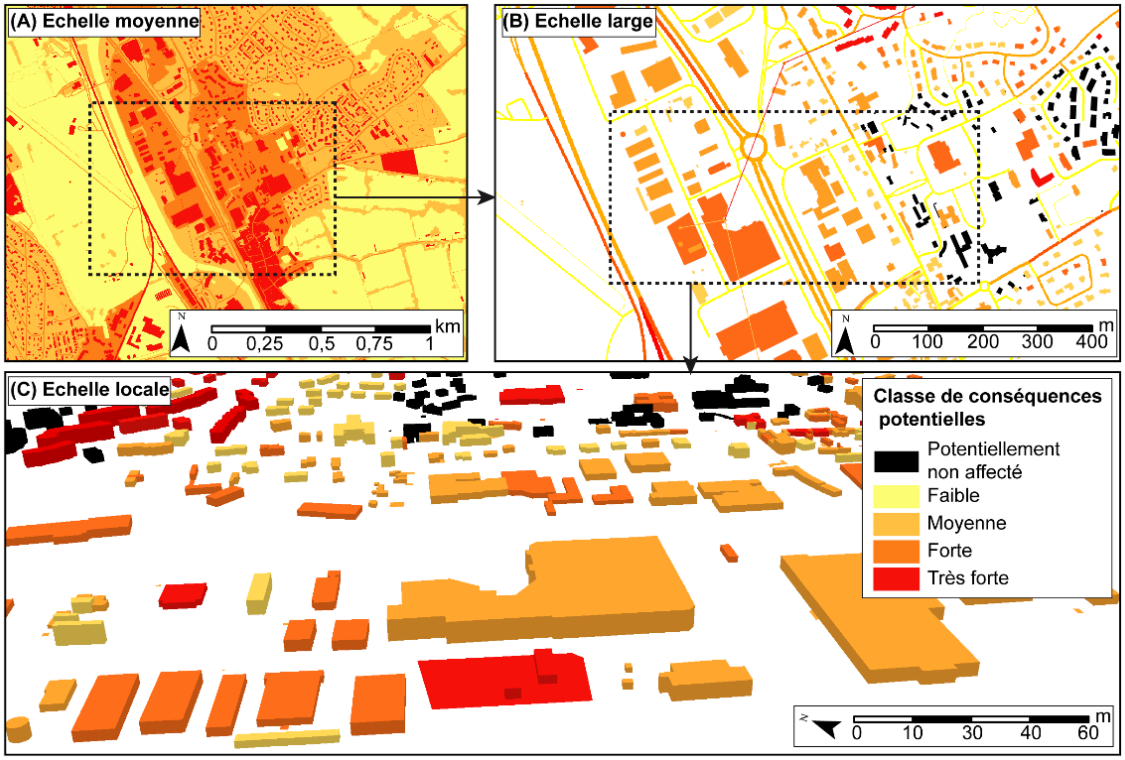


Figure 3.15 : Illustrations des conséquences potentielles aux trois échelles (moyenne, large et locale) sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville

Le développement du modèle APC s'est également articulé autour de la simplification des critères d'analyse considérés dans les différents types de conséquences potentielles. Par exemple, la méthode PDI considère quatre critères d'analyses pour définir les conséquences corporelles des éléments exposés (Lissak, 2012 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013) tandis que le modèle APC considère un unique critère d'analyse : la population estimée par bâtiment. Cette simplification s'opère également au niveau des types de conséquences potentielles en dissociant les conséquences structurelles et fonctionnelles en deux types différents de conséquences. Cette simplification doit apporter une plus grande cohérence sur les critères d'analyse considérés, mais également elle doit faciliter l'appropriation du modèle par divers utilisateurs et pour divers contextes géographiques (Petrucci et Gullà, 2010 ; Birkmann *et al.*, 2013 ; Khan et Samadder, 2015 ; Milanesi *et al.*, 2018). Le modèle intègre plusieurs types de conséquences (globales, corporelles, fonctionnelles, etc.) et plusieurs niveaux entre les types de conséquences (*i.e.* conséquences structurelles à échelle large et conséquences sur la structure des bâtiments à échelle locale) contrairement à des méthodes telles que le RVI (*Relative Vulnerability Index*) ou PTVA (*Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment*) qui considère exclusivement l'aspect structurel des éléments exposés (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007 ; Kappes *et al.*, 2012a ; van Westen *et al.*, 2014).

Les primitives géométriques utilisées et les critères d'analyse considérés aux différentes échelles spatiales sont prévus pour être accessibles sur une grande superficie du territoire français dans le but de faciliter l'appropriation et l'extrapolation de ce modèle. De plus, bien que les conséquences potentielles relatives aux différentes échelles d'analyses soient liées, elles sont produites indépendamment les unes des autres. Par conséquent, selon les besoins des utilisateurs, la quantité d'informations disponible sur le site d'étude ou les moyens matériels et financiers de l'organisation, une seule ou deux échelles d'analyses (e.g. échelle moyenne et large) sur les trois peuvent être considérées. En revanche, l'application de la méthode à

différents pays ou continent est étroitement liée aux bases de données disponibles (Kitchin, 2014 ; Daniel *et al.*, 2017 ; Saint-Martin *et al.*, 2018 ; Yılmaz et Canıberk, 2018 ; Graff *et al.*, 2019b). L'approche utilisée permet une adaptation, de la phase d'attribution d'indice, relativement simple en cas de l'application de la méthode à différents secteurs.

3.3.2.2. Limites et incertitudes du modèle APC

Les principales incertitudes du modèle sont liées à la nature même de l'approche employée : la part de subjectivité durant la phase d'attribution des valeurs « indice » aux attributs des critères d'analyse (Cooke *et al.*, 2008 ; Kappes *et al.*, 2012a ; Puissant *et al.*, 2013 ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2016 ; Gumus *et al.*, 2016). De plus, bien que la différence soit parfois faible (Kappes *et al.*, 2012b), le calcul des conséquences potentielles ne rend pas compte de la vulnérabilité des éléments exposés (Birkmann *et al.*, 2013 ; ~~Harb *et al.*, 2014~~ ; Armaş *et al.*, 2016 ; Martínez-Graña *et al.*, 2016 ; Kantamaneni *et al.*, 2018 ; Milanesi *et al.*, 2018 ; Sanchez *et al.*, 2018). Cette différence vient du fait que la vulnérabilité prend en considération un ou plusieurs scénarios d'aléa(s), et détermine le comportement de l'élément exposé en fonction de ce scénario (e.g. capacité de résistance d'un bâtiment pour un scénario de hauteur de 0,5 m, 1 m ou 1,5 m). L'application des conséquences potentielles à une analyse de risque ne peut donc s'opérer que sous forme matricielle ou de valeurs d'indices (Kappes *et al.*, 2012a ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018). L'intégration de ces conséquences sous forme de courbes de risque nécessite une adaptation et la transformation des critères d'analyses en indicateurs de vulnérabilité intégrés à un ou plusieurs scénarios (Corominas *et al.*, 2013 ; van Westen *et al.*, 2014 ; Godfrey *et al.*, 2015 ; Ciurean *et al.*, 2017 ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017).

L'intégration de différents systèmes de pondération et notamment un système de pondération spatial sert à apporter une nuance et réaliser un filtre sur les éléments exposés considérés. Dans le cas de cette étude, les secteurs « sujets à » différents processus sont considérés, mais ils ne se substituent pas à une analyse des aléas. Ces systèmes de pondération peuvent et doivent être adaptés aux objectifs de recherche fixés afin de faire ressortir des éléments spécifiques à ces objectifs (Cooke *et al.*, 2008 ; Drobne et Lisec, 2009 ; Lai *et al.*, 2015 ; Gumus *et al.*, 2016). Finalement, les difficultés d'application de ce modèle sont principalement liées aux bases de données disponibles sur les secteurs d'étude (modèle MSA et LSA, *cf.* chapitre 2).

3.3.2.3. Transposabilité ou reproductibilité de la méthode

En considérant l'ensemble du processus de caractérisation et de quantification des éléments exposés et des conséquences potentielles, le temps de travail dédié à l'intégration et à l'harmonisation des différentes bases de données géographiques dans une *data warehouse* est très important (Ponniah, 2001 ; Saint-Martin *et al.*, 2018). Par conséquent, il est plus facile d'appliquer le modèle de quantification APC à un site bien fourni en bases de données géographiques. Le développement croissant des bases de données collaboratives en libre accès, tel que *Open Street Map*®, permet l'application partielle de cette méthode sur de nombreux territoires en sachant que la qualité de la donnée sera variable selon la fréquentation ou la densité de population (Haklay, 2010 ; Jokar Arsanjani *et al.*, 2015 ; Fonte *et al.*, 2017).

Aussi, le temps de travail consacré à l'attribution d'indice (indexation) à chaque attribut des critères d'analyse peut être relativement long, notamment, pour considérer l'ensemble des attributs et éléments exposés présents sur le site d'étude. Ainsi, cette indexation doit s'opérer en combinant : 1) analyse bibliographique, 2) analyse de terrain, 3) participation des acteurs locaux (dans la mesure du possible) (services de l'état, bureau d'étude, etc.) afin d'éviter des controverses (Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018).

Finalement, l'adaptation du modèle à d'autres territoires signifie donc que l'on doit considérer différents systèmes de pondération en fonction des objectifs de recherche et des spécificités environnementales du site d'étude (e.g. présence d'avalanches, foyer des séismes, lahar, distance à un abri, etc.). Ces systèmes de pondération amènent une nuance sur l'attribution des valeurs d'indice des éléments exposés et réduisent la part d'incertitudes liées à une approche experte.

3.3.2.4. Développements futurs du modèle

Des axes d'amélioration du modèle sont envisagés (1) pour réduire les incertitudes liées à l'attribution des valeurs des indices, (2) pour améliorer les systèmes de pondération spatiaux et (3) pour proposer des systèmes de combinaison des critères plus performants. La part de subjectivité liée à l'attribution des valeurs d'indice peut être diminuée en changeant le système de *ranking* initial par l'attribution d'une valeur issue d'une approche statistique (e.g. *Pairwise comparison ou logique floue*, Lai *et al.*, 2015 ; Nezarat *et al.*, 2015 ; Potter *et al.*, 2016).

Cependant, le changement d'une approche experte à une approche statistique entraîne une plus grande complexification et diminue l'efficacité de l'application du modèle APC. Les systèmes de pondération spatiaux sont améliorables en intégrant d'avantage de paramètres dans la constitution des « filtres spatiaux ». Le système de combinaison linéaire est améliorable en utilisant des systèmes de *deep learning* (Figure 3.16) et en associant des règles de combinaison aux critères d'analyses pour faire ressortir de nouveaux éléments de réponse aux analyses des conséquences potentielles (Grekousis *et al.*, 2013 ; Shah *et al.*, 2017).

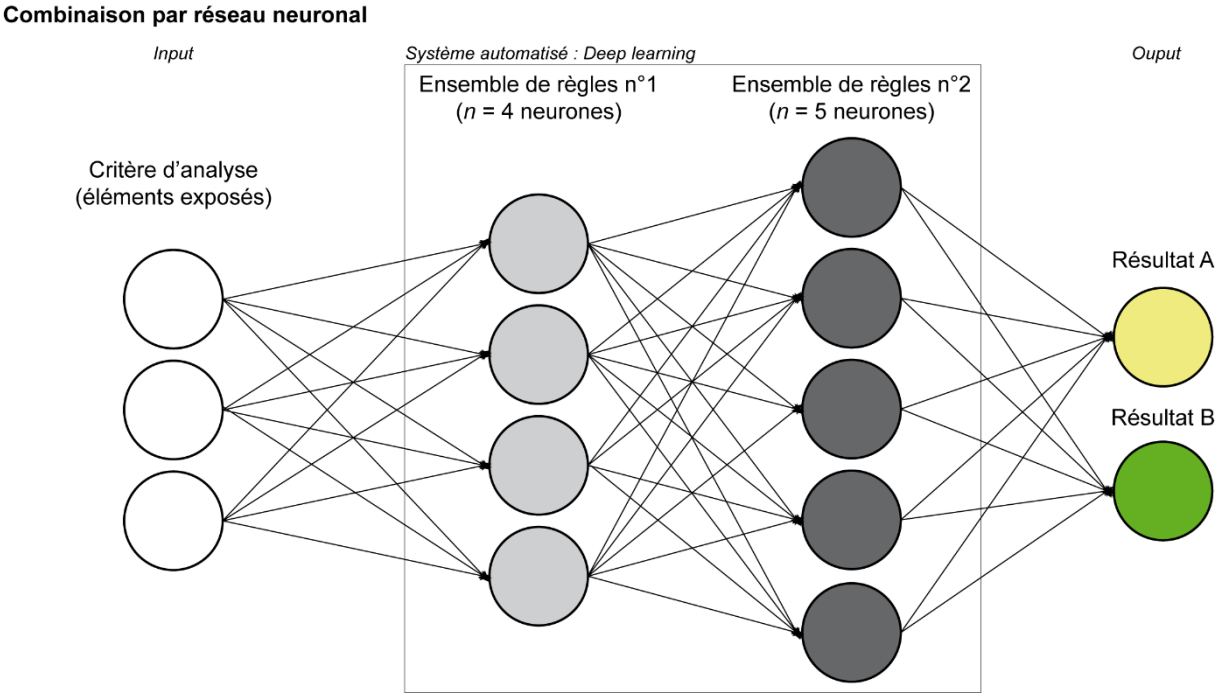


Figure 3.16 : Système de combinaison des critères d'analyses des éléments exposés par *Deep learning* (réseau neuronal) (modifié d'après Li et Yeh, 2002)

L'intégration de nouveaux critères, plus précis, sur la fonction et les caractéristiques physiques (humaines) des bâtiments à une échelle d'analyse locale pourrait être un des axes d'amélioration majeur du modèle de quantification. Ce développement pourrait être possible avec le développement progressif des différentes bases de données géographiques telle que la base de données DVF (Demande Valeur foncière, https://app.dvf.etalab.gouv.fr/) développée

depuis avril 2019. D'autres échelles spatiales peuvent être également considérées telles que des échelles régionale, nationale, voire mondiale, mais nécessitent une adaptation des primitives géométriques ainsi que des critères d'analyse considérés.

3.3.3. Conclusion

Les conséquences potentielles ont été calculées à trois échelles spatiales. *À une échelle d'analyse moyenne* (1 : 100 000 – 1 : 25 000) les conséquences globales très fortes (3 % de la surface totale du site d'étude n°1) sont déterminées sur la plupart des surfaces bâties, sur les centres urbains, les autoroutes, les voies ferrées et sur les systèmes d'énergie. *À une échelle d'analyse large* (1 : 25 000 – 1 : 10 000), les conséquences sur les infrastructures sont très fortes sur 605 bâtiments (2 %), 200 km de réseaux de transport (16 %) et 400 m de réseaux énergétiques (1 %). Les éléments exposés considérés sont les bâtiments, les départementales et les pylônes localisés sur les secteurs sujets aux inondations et glissements de terrain ainsi que les centres de soins et de secours exposés à un type d'événement. *À une échelle d'analyse locale* (1 : 10 000 – 1 : 2 000), les très fortes conséquences sur les structures des bâtiments sont déterminées sur 72 bâtiments et concernent l'ensemble des pavillons et bâtiments collectifs résidentiels localisés sur des secteurs sujets aux processus inondation et glissement de terrain.

Le modèle de quantification APC offre une analyse des conséquences potentielles à différentes d'échelles spatiales et en proposant une précision des primitives géométriques ainsi que des critères d'analyses adaptés à ces échelles. Une fois que la donnée est prête, le modèle est relativement simple à mettre en place et propose des règles de pondération et de combinaison peu coûteuses en temps et en matériels. Les incertitudes du modèle sont liées à l'attribution même des indices intégrant une part de subjectivité. De plus, le modèle est entièrement dépendant de la qualité de la donnée en entrée. La transposition (reproductibilité) de ce modèle à différents sites d'étude dépend exclusivement du nombre de bases de données disponibles et de la qualité des données du site d'étude.

3.4. Intégration des conséquences potentielles à des analyses de risque

Avant de clore ce chapitre, il nous a semblé intéressant d'évoquer les différentes approches possibles pour intégrer les résultats obtenus sur la quantification des conséquences potentielles à partir du modèle de quantification APC à des analyses d'évaluation et de cartographie du risque (d'abord dans le cadre du projet ANR RICOCHET qui se poursuit au-delà de cette thèse de doctorat, et plus généralement pour les analyses du risque). Ces analyses de risque requièrent que l'aléa soit défini en termes d'extension spatiale, d'intensité et d'occurrence temporelle selon différents niveaux (Léone *et al.*, 1996 ; Muis *et al.*, 2015 ; Yin *et al.*, 2017 ; van der Fels-Klerx *et al.*, 2018).

Sans vouloir prétendre à être exhaustif, nous abordons ci-après deux approches pouvant être envisagées pour croiser les différentes données et calculer ou évaluer les niveaux de risque : une approche matricielle de type « *qualitative* » (section 3.4.1) et une approche par indice de type « *semi-quantitative* » (section 3.4.2).

3.4.1. Essai d'évaluation du risque inondation par une approche matricielle

L'approche matricielle est une des approches les plus rapides et les plus efficaces pour le calcul des différents types de risque (Chiesa *et al.*, 2003 ; Thierry *et al.*, 2008 ; Kappes *et al.*, 2012b ; Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Ce calcul requiert une discrétisation des valeurs de

conséquences potentielles et des aléas en rang (faible, moyen, fort, très fort). Selon les auteurs, le rang moyen (Garry *et al.*, 1997 ; Delattre *et al.*, 2002 ; Cariam, 2006 ; MATE/METL, 2016) ou le rang maximal (Heinimann *et al.*, 1998 ; Chiesa *et al.*, 2003) est considéré pendant la détermination de la valeur du risque.

L'approche matricielle rend compte d'un niveau de risque donné à un instant *t* (Kappes *et al.*, 2012b). À travers un ajustement de leurs complexités, les matrices sont couramment utilisées dans les analyses multi-aléas et multirisques, car elles permettent : (1) un calcul rapide de différents risques présents sur un territoire donné ; (2) la possibilité d'intégrer plusieurs aléas et risques pour une même analyse (e.g. aléa primaire/aléa secondaire, Pescaroli et Alexander, 2015) ; (3) une facilité de transmission des résultats et modèles auprès des acteurs et des décideurs locaux (Rodriguez-Acosta et Rosenbaum, 2005 ; Crowley *et al.*, 2017 ; Sanchez *et al.*, 2018).

Un essai de calcul par une approche matricielle a été réalisé sur un secteur du site d'étude n°1 en croisant la cartographie de l'aléa inondation issue du PPRi de la basse vallée de La Touques (DDTM 14, 2016) et la cartographie des conséquences potentielles (discrétisées) sur les infrastructures (corporelles + fonctionnelles + structurelles) à une échelle d'analyse large (Figure 3.17). Les classes de conséquences potentielles utilisées sont les mêmes que celles calculées dans la section 3.3.1.2 (Figure 3.11).

Conséquences sur les infrastructures (échelle large) \ Aléa (inondation - PPR)	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
Faible	Nul	Faible	Faible	Moyen	Moyen
Moyen	Nul	Faible	Moyen	Fort	Fort
Fort	Nul	Moyen	Fort	Fort	Très fort
Très fort	Nul	Moyen	Fort	Très fort	Très fort

Figure 3.17 : Évaluation des niveaux de risque par croisement de l'aléa inondation (DDTM, 2016) et des conséquences sur les infrastructures (bâtiments et réseaux) par une approche matricielle (qualitative)

Il apparaît que le calcul du risque (qualitatif) est extrêmement rapide. Les résultats d'analyse des risques aux inondations ont montré que l'extension spatiale (buffer) des secteurs potentiellement sujets aux inondations, au sein du système de pondération spatial (DT_1), a été suffisante pour recouvrir intégralement les zones d'aléas (DDTM 14, 2016).

Pour le secteur considéré localisé sur la commune de Touques et dans la zone industrielle (sud) de Deauville (Figure 3.18), cet essai de calcul matriciel des risques montrerait que 31 bâtiments (0,1 %) et 43 km de réseau (3,6 %) seraient soumis à un très fort risque aux inondations.

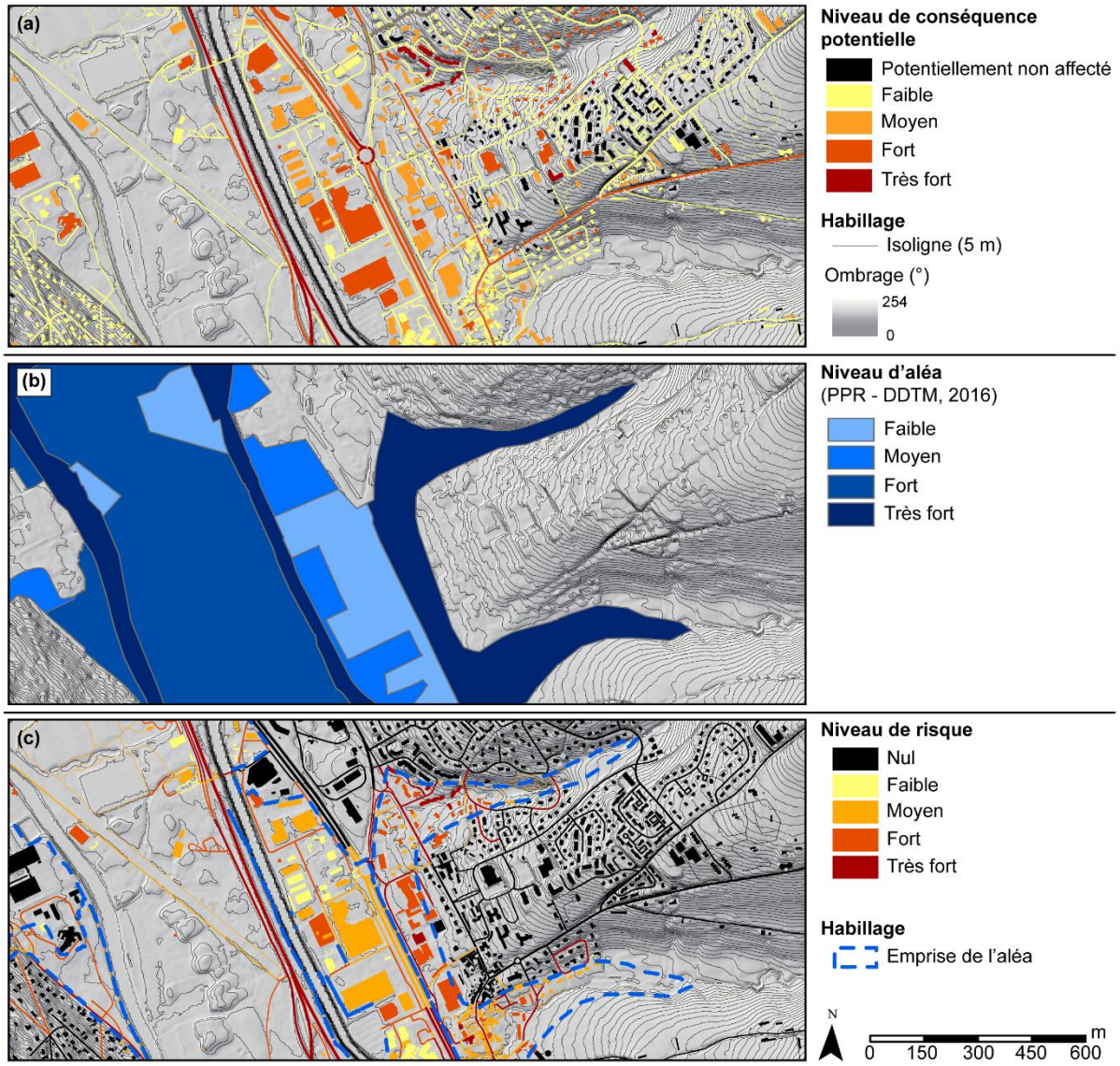


Figure 3.18 : Essai de calcul matriciel du niveau de risque aux inondations à l'exutoire du bassin des Ouïs et des Valasses sur la commune de Touques

Cet essai apporte une information simplifiée des risques contrairement à une analyse de la vulnérabilité et des aléas nécessitant l'intégration d'un scénario et de plusieurs résultats à différentes périodes : risques d'inondation à 0,5 m de hauteur d'eau, à 1 m, à 1,5 m, etc. (Scheuer *et al.*, 2011 ; Karagiorgos *et al.*, 2016 ; Martínez-Graña *et al.*, 2016 ; Rau *et al.*, 2017 ; Milanesi *et al.*, 2018). L'essai d'analyse des risques nous a montré la facilité d'intégration des résultats d'analyse de conséquences potentielles à au moins un type d'aléa. L'analyse des conséquences potentielles, selon une approche par combinaison matricielle des risques, semble donc être particulièrement appropriée dans le cas d'une analyse multi-aléas et multirisques. (Kappes *et al.*, 2012b ; Harb *et al.*, 2014 ; Garcia-Aristizabal *et al.*, 2015 ; Karagiorgos *et al.*, 2016 ; Sahoo et Bhaskaran, 2018).

3.4.2. Essai d'intégration des conséquences potentielles à des calculs d'indices de risque

Fondamentalement, le modèle APC développé dans le cadre de méthodes orientées « indice » (basé sur la méthode PDI) est optimisé pour l'intégration à des calculs d'indices de risque

(Maquaire *et al.*, 2004 ; Lissak *et al.*, 2013 ; Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018). Contrairement à une approche matricielle, les indices rendent compte d'une plus grande précision sur le degré de risque des éléments exposés, mais l'étape de discrétisation peut être soumise à controverse selon la méthode utilisée (seuils naturels de Jenks par exemple) lors de la transmission des résultats.

L'évaluation de l'aléa doit préférentiellement être calculée par combinaison de plusieurs valeurs d'indice attribuées aux critères d'analyse (e.g. géologie, pente, courbure, etc.) afin de conserver une certaine cohérence durant la combinaison des conséquences et des aléas (Thiery *et al.*, 2007 ; Khan et Samadder, 2015 ; Satta *et al.*, 2016 ; Fressard *et al.*, 2016 ; Kantamaneni *et al.*, 2018 ; Sanchez *et al.*, 2018).

L'intervalle de valeur considérée doit s'adapter aux objectifs de recherche. Par exemple, la méthode PDI considère des valeurs d'indice de risque comprises entre [11, 55] (Puissant *et al.*, 2013 ; Carlier *et al.*, 2018) (Figure 3.19).

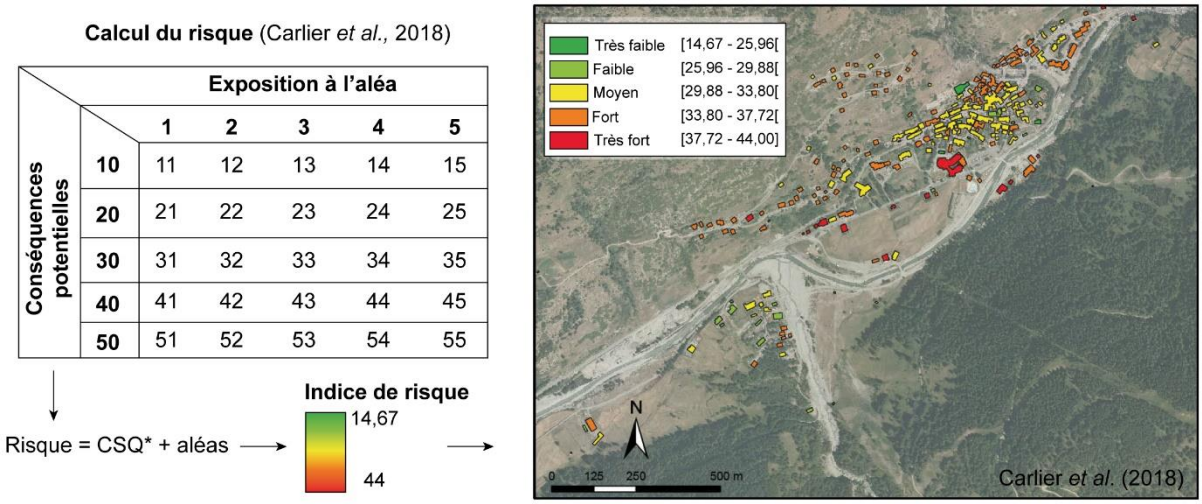


Figure 3.19 : Calcul d'un indice de risque à partir des conséquences potentielles (PDI) et d'un aléa (inondation) sur la commune d'Aiguilles (05) (issu de Carlier *et al.*, 2018)

Sur le même secteur que précédemment, nous avons tenté une mise en indice de l'aléa inondation en cinq classes avec des valeurs d'indices comprises dans la gamme des valeurs retenues pour les conséquences potentielles calculées par la méthode APC (valeurs d'indices comprises entre [0, 1]) (Figure 3.20). Dans cet exercice, avons adapté les calculs d'indice de risque de la méthode APC dans des gammes de valeurs comprises entre 0 et 1 et en considérant le produit des conséquences potentielles (*cf.* introduction générale) par rapport à un aléa (voir b – Figure 3.18). Afin de tester cette méthode, un indice de 0 est attribué en cas d'absence d'aléa et une valeur de 1 est attribuée à une classe d'aléa très forte.

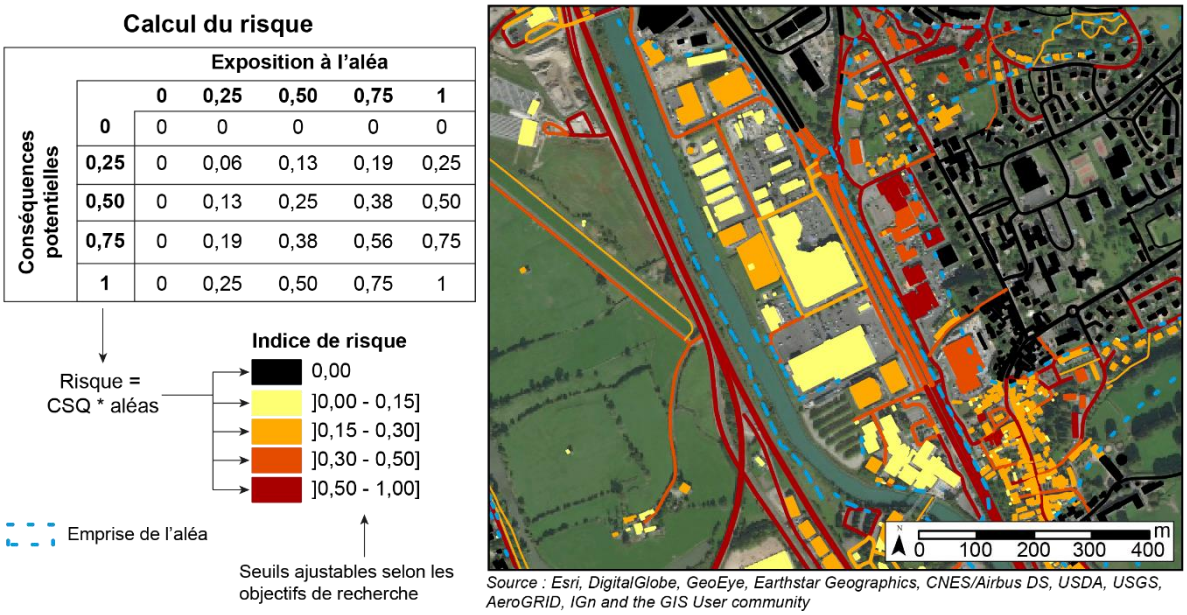


Figure 3.20 : Essai de calcul d'un indice de risque (inondation) à l'exutoire du bassin des Ouïs et des Valasses sur la commune de Touques

Les résultats obtenus avec les deux méthodes (matricielle et par indices) montrent ici, et comme on pouvait s'y attendre, des différences d'évaluation du niveau de risque. Les seuils utilisés doivent donc faire l'objet d'une analyse plus complète pour être correctement adaptés aux différents contextes et traduire des classes de risque plus réalistes. Alors qu'une analyse matricielle fournit directement un résultat de risque par rapport à une typologie donnée (e.g. conséquence faible + aléa moyen = risque moyen), une analyse par indice permet de mieux ajuster le degré de risque à considérer aux différentes classes.

L'utilisation d'indice permet une comparaison plus simple des résultats de conséquences potentielles et de risque provenant d'autres méthodes orientées « indices », mais nécessite une analyse détaillée des différentes primitives géométriques et critères d'analyses considérés dans la quantification des conséquences, de l'aléa et du risque (van Westen *et al.*, 2006, 2008).

3.5. Conclusion du chapitre

L'utilisation de trois échelles spatiales fournit une analyse complète des éléments exposés et de leurs différentes conséquences potentielles (globales, corporelles, fonctionnelles et structurelles). Ces différentes conséquences potentielles ont pu être évaluées grâce à l'intégration de plusieurs primitives géométriques auxquelles sont attribués des critères d'analyse. Plus l'échelle spatiale considérée est précise (grande), plus le nombre de critères d'analyse utilisés est important. Il est raisonnable de considérer les éléments exposés entre une échelle moyenne (1 : 100 000 – 1 : 25 000) et une échelle locale (1 : 10 000 – 1 : 2 000). Les échelles d'analyses plus précises (> 1 : 2 000) sont préférées dans le cadre d'une approche opérationnelle (plan communal de sauvegarde, assurance des biens et des personnes, etc.). Au-delà d'une échelle d'analyse moyenne (*i.e.* échelle régionale, nationale, etc.), le modèle de quantification peut être envisagé, mais requiert une adaptation des primitives géométriques ainsi que des critères d'analyses considérés.

À l'échelle locale, la prise en compte de la dimension géomorphologique, c'est-à-dire l'identification de secteurs sujets à tel ou tel type de processus et/ou d'aléa (e.g. plaine sujette à des inondations par submersion ou débordement, versants sujets à des glissements de terrain, etc.), avec les systèmes de pondération spatiaux permet d'estimer de potentiels « *hotspots* ». Il s'agit donc de secteurs à forts enjeux et à fortes ou très fortes conséquences potentielles. Ainsi, sans déjà connaître précisément l'aléa (niveau et spatialisation), ces systèmes de pondération différenciés offrent la possibilité d'opérer des zooms et de cibler la recherche d'information sur différents secteurs potentiellement « sujets à » des glissements de terrain, des inondations, etc.

Bien que les méthodes semi-quantitatives, orientées « indice » (experte), possèdent une part de subjectivité, elles sont plus faciles et rapides à appliquer que les méthodes quantitatives (ingénieries) et plus précises qu'une approche qualitative (experte) classique. Cependant, cette attribution des valeurs d'indices aux attributs des critères peut être une source de controverse en fonction de la vision des différents opérateurs et utilisateurs. La transposition du modèle de quantification APC doit considérer les nouveaux éléments exposés (*i.e.* centrale nucléaire, cheminée industrielle, etc.) et le rang attribué aux différents attributs des critères d'analyse doit s'adapter à ces ajouts. Une adaptation des systèmes de pondération (attributaire, spatial, etc.) doit être considérée en fonction des objectifs de recherche et des particularités des différents sites d'étude considérés.

Les cartes de conséquences potentielles obtenues aux différentes échelles pourront ainsi être utilisées et croisées avec des cartes d'aléas par différentes approches (matricielles, par indices ou autres) pour obtenir des cartes de risques voire des cartes multirisques.

Chapitre 4. Analyse statistique des concomitances hydrologiques

Les interactions entre l'embouchure des rivières littorales et la mer sont des éléments souvent décrits dans la littérature et les rapports d'expertise et nécessitent une quantification pour être mieux intégrées dans les analyses de risque. Ce chapitre quantifie à travers une analyse statistique (régression linéaire) les lames d'eau liées aux concomitances entre les conditions marines et hydrologiques des rivières aux embouchures de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle. Cette analyse intègre des variables hydrologiques (débit de base, niveau des nappes, etc.), des variables météorologiques (précipitations, saturation des sols, etc.) et des variables marines (surcotes, hauteur d'eau en mer, etc.). Pour chacune des embouchures, trois situations hydrodynamiques ont été déterminées pour identifier le plus justement possible la réponse de la lame d'eau (rivières) aux conditions marines. À partir d'une extraction des hauteurs des variables marines issues des analyses statistiques, un indice de concomitance hydrologique a été élaboré (ICH – Indice de concomitances hydrologique) afin de classer les embouchures et les tempêtes majeures en Manche.

4.1. Introduction du chapitre

Le postulat de départ à l'analyse des interactions entre les rivières littorales et les niveaux marins en mer de la Manche est que la mer a une influence permanente sur la lame d'eau au sein des rivières littorales à leurs exutoires. Dans ce cas, la lame d'eau est appelée lame d'eau excédentaire (Fisson *et al.*, 2014 ; Fisson et Lemoine, 2016). Cette lame d'eau excédentaire est issue de l'interaction entre la rivière et la mer et n'aurait pas pu survenir autrement. Cette influence ne sera, cependant, pas toujours la même et dépendra de variables hydrologiques (niveaux piézométriques, débits de base de la rivière), variables météorologiques (précipitations efficaces, bilans hydriques, etc.) et variables marines (hauteurs d'eau observées, prédites, etc.). Par exemple, l'influence marine à l'embouchure des rivières littorales sera beaucoup plus faible en période de hautes mers de basses-eaux que pendant des périodes de hautes mers de vives-eaux (SHOM, 2017).

L'objectif de ce chapitre est de développer une méthodologie pour mettre en évidence les effets de concomitance sur les territoires côtiers et d'apporter de nouveaux éléments de réponses sur la lame d'eau engendrée par un potentiel blocage des écoulements dans les embouchures.

Les différents rapports des services de l'État (DREAL, DDTM, GIP Seine-Aval, etc.) indiquent ponctuellement de fortes interactions entre les différents phénomènes : e.g. réactivation d'un glissement de terrain à Trouville-sur-Mer à la suite des inondations de juin 2003 (Fressard, 2013) ; influence de la mer, durant l'inondation de novembre 2000 dans la basse vallée de la Touques, ressentie jusqu'à 13 km dans les terres (DDTM, 2016). Ainsi, nous avons pu déterminer quatre catégories de concomitance possibles liées à des débordements de cours d'eau que nous avons appelées des « concomitances hydrologiques » (Chapitre 4.Figure 4.1).

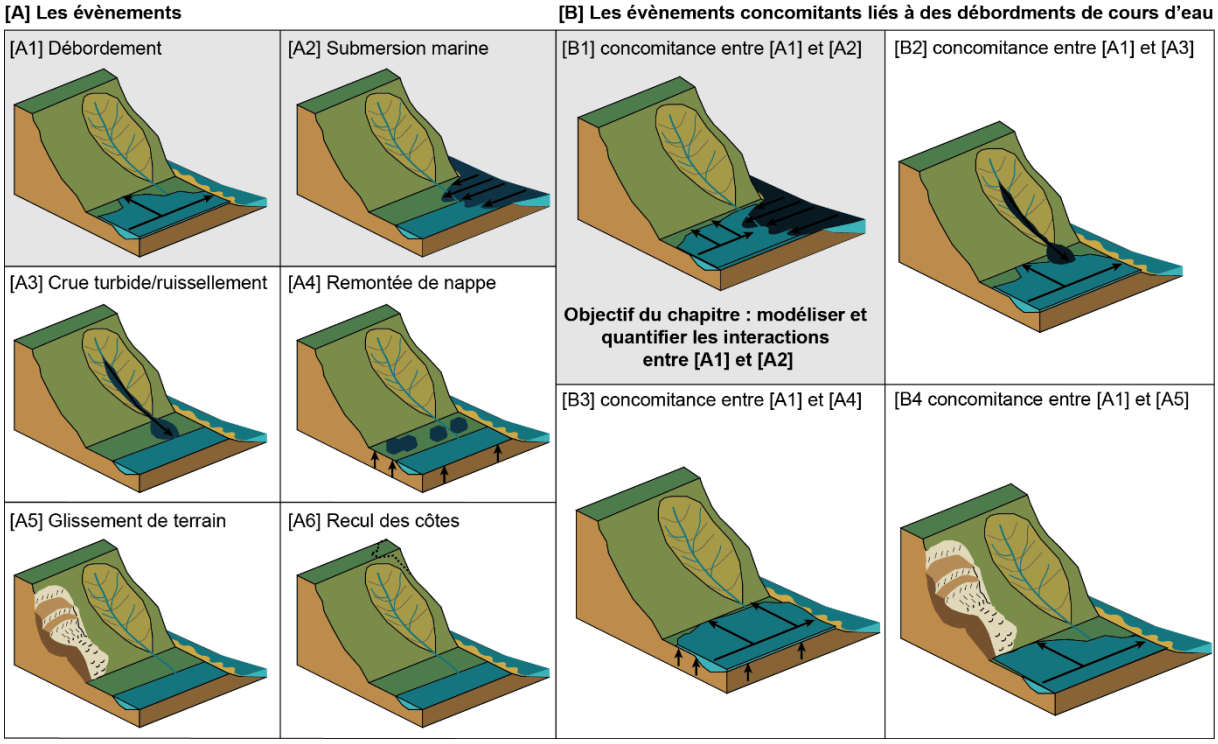


Figure 4.1 : Les différents types d'événements pouvant affectés un territoire côtier et les événements concomitants liés aux débordements de cours d'eau

Ces concomitances s'opèrent entre :

(1) Des débordements de cours d'eau [A1] et des submersions marines [A2] – concomitances de type [B1] ;

(2) Des débordements de cours d'eau [A1] et des crues turbides (ou ruissellement concentré) [A3] – concomitances de type [B2] ;

(3) Des débordements de cours d'eau [A1] et des remontées de nappes [A4] – concomitances de type [B3] ;

(4) Des débordements de cours d'eau [A1] et des glissements de terrain [A5] – concomitances de type [B4].

Dans le cadre de cette thèse, ainsi que dans le projet ANR RICOCHET, nous nous sommes focalisés sur les interactions entre les débordements de cours d'eau et les submersions marines [B1] (en lien avec des tempêtes majeures). Les concomitances [B2], [B3] et [B4] ne seront pas abordées dans ce travail de thèse en raison principalement d'un manque de données disponibles. Seulement quelques études se focalisent sur la simultanéité des phénomènes naturels et restent généralement descriptives (Gallina *et al.*, 2016). Les difficultés à quantifier les concomitances sont liées à :

- Des approches méthodologiques ainsi qu'à des résolutions spatio-temporelles différentes pour chacun des phénomènes identifiés ;
- Des forçages d'origines multiples (e.g. transferts de masse continentale et forçages marins) ;
- Des hypothèses d'indépendance entre les phénomènes et les différents forçages sans envisager les interactions et sans évaluer de probables effets en cascade ;
- La modélisation physique des processus provenant de différentes sources pouvant engendrer de nombreuses incertitudes et des erreurs ;
- La compréhension de l'équilibre des influences marines et continentales dans les environnements littoraux (Delmonaco *et al.*, 2006 ; Marzocchi *et al.*, 2009 ; van Westen *et al.*, 2014 ; Chen *et al.*, 2016 ; Bathrellos *et al.*, 2017 ; Ciurean *et al.*, 2017).

Pour faire face à ces difficultés, plusieurs programmes de recherches ont établi des méthodes robustes pour différents environnements (e.g. HAZUS aux USA, FEMA, 2007 ; RIsK Scape en Nouvelle-Zélande, Schmidt *et al.*, 2011 ; CAPRA en Amérique Centrale ; Mountain Risks, Kappes *et al.*, 2012b ; Marzocchi *et al.*, 2009 ; MATRIX, Marzocchi *et al.*, 2012 ; SAMCO, Grandjean *et al.*, 2012). Chaque projet guide l'utilisateur à travers une procédure d'évaluation des multi-aléas avec une interface simple. Récemment, des procédures ont été développées pour l'évaluation multi-aléas dans les environnements côtiers : l'approche Costal Hazard Wheel[1] développée par Rosendhal Appelquist (2012). Cette méthode permet la détermination des *hotspots,* mais à petite échelle. Donc même si la procédure est prometteuse et applicable à différentes échelles, elle reste difficile à appliquer, à l'échelle locale, pour obtenir une vision plus complète de l'évaluation et de la cartographie multi-aléas (Rosendhal Appelquist et Balstøm, 2015).

[1]Approche Costal Hazard Wheel : https://www.coastalhazardwheel.org/

En particulier, deux aspects sont généralement ignorés en négligeant les processus au sein du continuum terre-mer :

- *Les facteurs de forçage* (e.g. hauteurs d'eau, courants marins, précipitations efficaces, etc.) sont considérés indépendamment sans tenir compte des interactions possibles entre les processus ;
- *Les « effets en cascade » (couplage) et les rétroactions (positives ou négatives)* entre les différents processus (e.g. blocage des écoulements par la mer durant les tempêtes Viviane et Wiebke le 27 février 1990 à l'embouchure des rivières du département de Seine-Maritime, DDTM 2016).

Ces aspects sont négligés en raison d'un problème méthodologique. Actuellement, les différents modèles ont été développés et paramétrés pour étudier un phénomène en particulier (e.g. le modèle RuiCells pour les crues turbides (Douvinet *et al.*, 2009), le modèle ADCIRC (*ADvanced CIRCulation model)* pour les simulations de marée (Lerma *et al.*, 2013), etc.). La prise en compte des facteurs de forçage et des « effets en cascade » nécessiterait (1) le développement de modèles spécifiques, car une simple interopérabilité des différents modèles n'apparaît pas possible et (2) la mise en œuvre d'analyse statistique des concomitances hydrologiques.

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur les potentiels effets de concomitance entre la lame d'eau dans les rivières, dans les embouchures, et le blocage des écoulements par la mer (en lien avec des surcotes marines, hauts niveaux marins, etc.). Nous avons utilisé un **modèle de régression linéaire multiple (RLM)** pour déterminer les relations statistiques entre ces concomitances. **Trois situations hydrodynamiques** ont été déterminées pour l'application du modèle :

(1) Toutes dates confondues (sans exclure de données) ;

(2) Durant des conditions propices à des débordements et à des effets de blocage des écoulements par la mer (élaboration d'un filtre à partir d'une analyse statistique multivariée) ;

(3) Durant des événements de débordement de cours d'eau (déterminés à partir d'un inventaire issu de plusieurs sources d'information).

La réponse de la lame d'eau, dans les embouchures, est donc déterminée grâce à la différence entre un écoulement avec et sans blocage de la lame d'eau (Figure 4.2).

Les embouchures et les basses vallées littorales sont des secteurs soumis à une influence marine. Dans les vallées littorales de la région Normandie, ces deux termes tendent à se confondre pour décrire un même espace. Dans ce chapitre, nous utilisons le terme embouchure puisque nous analysons le linéaire du cours d'eau depuis l'exutoire jusqu'au point d'influence maximale de la mer (*cf.* Chapitre 1).

Dans un souci de facilité de lecture des données issues des différentes stations de mesure, fournissant des valeurs sur les hauteurs d'eau (en rivière, en mer, etc.), et afin de mieux les distinguer les variables utilisées, nous avons établi une liste de définitions des termes.

Pour l'analyse des variables hydrologiques :

- La « **lame d'eau** » correspond à la hauteur d'eau mesurée par une station de mesure hydrologique dans un bassin versant ;
- La « **lame d'eau excédentaire** » correspond au surplus de hauteur d'eau, dans le cours d'eau, engendré par un effet de blocage des écoulements par la mer ;

- La « **surface inondée excédentaire** » correspond aux secteurs qui ont été inondés en raison d'un blocage des écoulements par la mer (cf. chapitre 5) ;
- Le « **volume d'eau excédentaire** » correspond au volume d'eau engendré par un effet de blocage des écoulements par la mer (cf. chapitre 5) ;
- Le « **niveau piézométrique** » correspond au niveau du toit de la nappe phréatique pouvant s'exprimer en altitude par rapport à un niveau marin de référence (en m NGF) ou en profondeur par rapport au terrain naturel (zone vadose) ;

Pour l'analyse des variables météo-climatiques :

- Les « **précipitations** » correspondent à la pluie totale enregistrée par une station météorologique ;
- Les « **précipitations efficaces** » correspondent à la différence entre les précipitations avec l'évapotranspiration et la réserve utile des sols ;
- La « **réserve utile** » correspond à une quantité d'eau pouvant être absorbé par les sols ;
- Le « **surplus hydrologique** » correspond aux précipitations ruisselées et ne pouvant être absorbées par la réserve utile ;

Pour l'analyse des variables marines :

- La « **hauteur d'eau en mer observée** » correspond à une mesure verticale d'une surface d'eau liquide (en mer) enregistrée par un marégraphe et exprimée selon un réseau de repère altimétrique (le nivellement général de la France (NGF) ou le zéro hydrographique[2] (ZH)) ;
- La « **hauteur d'eau en mer prédite** » correspond à une modélisation d'une mesure verticale d'une surface d'eau liquide (en mer) pouvant être exprimée également selon le repère NGF ou ZH ;
- La « **surcote (ou décote)** » est la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui aurait dû se produire en présence de la marée astronomique seule (SHOM, 2017). C'est donc une valeur calculée par différence entre la hauteur d'eau observée et prédite mer.

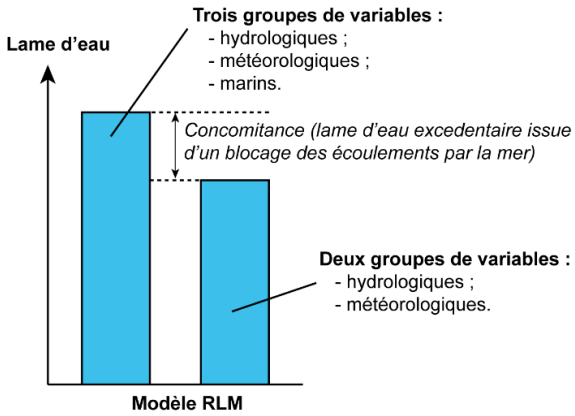


Figure 4.2 : Méthode d'analyse des concomitances grâce à un modèle de régression linéaire multiple (RLM)

[2] *Le zéro hydrographique (ZH) est un repère altimétrique en mer déterminé à partir du niveau des plus basses mers astronomiques (SHOM, 2013). Ce repère est théorique et va être variable selon les différents ports de référence (+ 4,38 m au port du Havre et + 4,45 m au port de Dieppe)*

Ainsi ce chapitre est structuré en cinq sections. La section 4.1 est l'introduction du chapitre. La section 4.2 présente les caractéristiques du modèle RLM ainsi que les données intégrées dans le modèle. La section 4.3 présente les résultats des analyses statistiques. La section 4.4 est une analyse et mise en place d'un indice de concomitance hydrologique (ICH) et la section 4.5 est la conclusion de ce chapitre.

4.2. Fonctionnement du modèle de régression linéaire multiple (RLM) et données utilisées

La détermination de l'influence de la lame d'eau (variable à expliquer), à l'embouchure des rivières littorales, nécessite la détermination de variables hydrologiques, météorologiques et marines (variables explicatives) (Zhang *et al.*, 2016 ; Woldesenbet *et al.*, 2017). Cette mise en interaction requiert donc une analyse statistique (Benediktsson *et al.*, 1990 ; Tehrany *et al.*, 2013). Des méthodes, plus ou moins complexes, ont ainsi été développées depuis les dernières décennies, basées sur : des réseaux neuronaux, de la logique floue, des arbres de décision (*random forest*) ou encore de la régression linéaire (Wei et Chen, 2009 ; Castillo Soto, 2012 ; Grekousis *et al.*, 2013 ; Grekousis et Thomas, 2012 ; Lai *et al.*, 2015 ; Nezarat *et al.*, 2015 ; Potter *et al.*, 2016). Les modèles de régression servent spécifiquement à déterminer la réponse d'une variable dépendante par rapport à une variable explicative (Pandey et Nguyen, 1999 ; Lee et Pradhan, 2007 ; Preacher *et al.*, 2006 ; Pradhan, 2010). Un modèle de régression linéaire multiple (RLM) offre la possibilité d'intégrer plusieurs variables pour la détermination de la réponse d'une variable dépendante (Preacher *et al.*, 2006).

Même si les données disponibles ont été collectées à l'amont de la réflexion sur la manière de traiter ces données, dans cette section nous avons d'abord choisi de présenter les caractéristiques du modèle de régression linéaire multiple (RLM) qui sera utilisé pour l'analyse statistique (section 4.2.1), puis de présenter les stations et les chroniques de données disponibles à intégrer à l'analyse statistique (stations de mesure, chroniques, etc.) (section 4.2.2).

4.2.1. Caractéristiques des modèles de régression linéaire multiple

Parmi les différents modèles de régression (non linéaire, polynomiale, logistique, généralisé, non paramétrique, etc.), les modèles de régression linéaire multiple (RLM) sont les plus courants dans la littérature en raison de la simplicité d'utilisation (Galton, 1989).

Dans notre étude, le modèle RLM est appliqué pour les embouchures. La forme matricielle d'un modèle RLM [1] comprend une variable dépendante y (*i.e.* la lame d'eau dans les embouchures) comprise dans une dimension (n, 1), x est la variable explicative (variables hydrologiques, marines, etc.) comprise dans une dimension (n, p+1), a est le coefficient à estimer du modèle compris dans une dimension (p+1, 1) et ε est l'erreur observée du modèle compris dans une dimension (n, 1) (Preacher *et al.*, 2006).

$$[1] \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & \cdots & x_{1,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & \cdots & x_{n,p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

Le modèle RLM est paramétré sur un pas de temps homogène et commun à l'ensemble des chroniques utilisées.

4.2.1.1. Variables utilisées dans l'élaboration du modèle RLM

La réponse de la lame d'eau, dans les embouchures, est déterminée grâce à des variables hydrologiques, météorologiques et marines (Cooper, 2002 ; Fan et Huang, 2008 ; Letortu *et al.*, 2016 ; Costa *et al.*, 2019) (Figure 4.3).

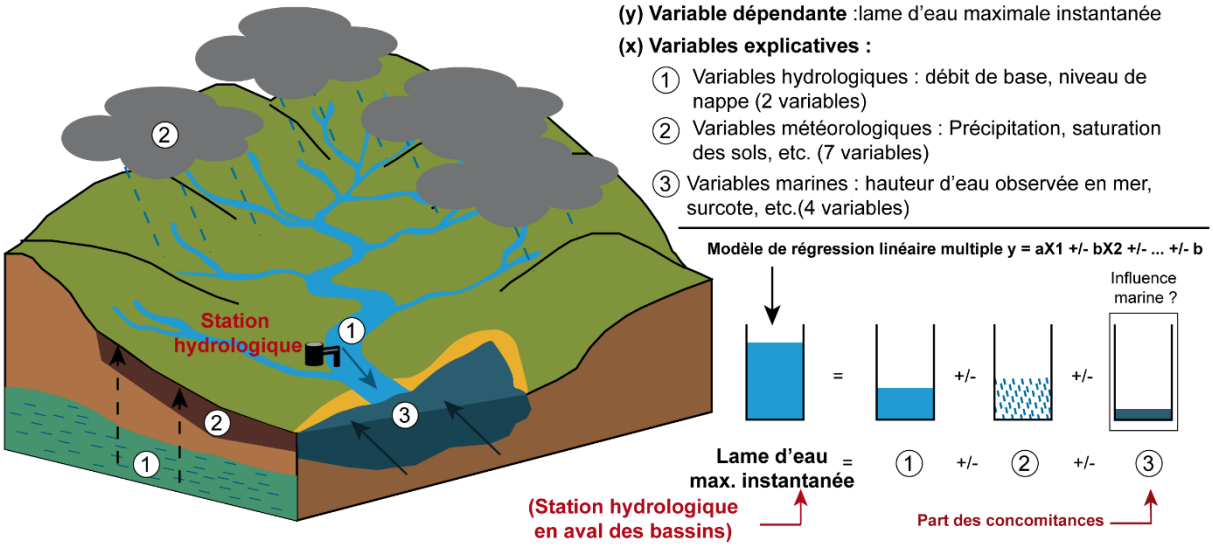


Figure 4.3 : Variables hydrologiques, météorologiques et marines utilisées dans le modèle RLM

Les **variables hydrologiques** sont déterminées à partir :

(1) Du débit de base de la rivière (Sliding Interval Method) ;

(2) Des hauteurs piézométriques de la nappe (Alnedawy *et al.*, 2015 ; Foudi *et al.*, 2015 ; Evin *et al.*, 2019).

Les **variables météorologiques** sont déterminées à partir :

(1) Des précipitations (trois variables) – précipitations nettes totales, précipitations efficaces, précipitations efficaces cumulées sur sept jours glissants (Cooper, 2002 ; Brown *et al.*, 2007 ; Braud *et al.*, 2014 ; Martínez-Graña *et al.*, 2016) ;

(2) Du bilan hydrique (quatre variables) – réserve utile, reconstitution de la réserve utile, chargement de la réserve utile et le surplus hydrologique (Boughton, 2004 ; Sivapalan *et al.*, 2005 ; Douvinet *et al.*, 2009 ; Van Der Knijff *et al.*, 2010 ; Letortu *et al.*, 2016).

Les **variables marines** sont déterminées à partir :

(1) Des hauteurs de mer (deux variables) – observées et prédites (Desmare et Nicolle, 2012 ; Idier *et al.*, 2012) ;

(2) Des surcotes marines ;

(3) De la durée de blocage potentielle des écoulements pour un niveau marin de pleine mer et de vives-eaux (Fisson *et al.*, 2014 ; Fisson et Lemoine, 2016).

Les coefficients (a) calculés pour l'ensemble des variables utilisées vont avoir une influence positive, négative, ou nulle sur la réponse de la lame d'eau (ε) selon les embouchures considérées (dimension n). Ces variables doivent être de type quantitatif et être déterminées sur un pas de temps commun nécessitant des interpolations ou des extrapolations des données.

4.2.1.2. Pas de temps considérés et situations hydrodynamiques

Les données entrées dans le modèle RLM doivent nécessairement être calibrées sur le même pas de temps pour pouvoir être comparées. Ce pas de temps se traduit en seconde, minute ou en heure dans le cas de mesure continue à haute-fréquence et en jour ou mois dans le cas de mesure continue à basse fréquence (Robert Brakenridge *et al.*, 2012). Dans le cas d'une analyse impliquant de multiples stations de mesure, utilisant des mesures à haute ou basse fréquence localisées sur des sites parfois distants de quelques kilomètres, un décalage (*i*) peut être ressenti entre une mesure prise sur une station A (e.g. marégraphe) et une mesure prise sur une station B (e.g. station hydrologique) pour un même événement (Figure 4.4). En considérant un pas de temps horaire ou inférieur (minute, seconde), ce décalage varie selon :

(1) L'intensité de l'événement considéré ;

(2) La distance à laquelle sont situées les stations de mesure (cf. section 4.2.2) ;

(3) L'intensité du processus mesuré durant un événement.

Dans le cas où les stations de mesure sont systématiquement placées à des endroits différents et à des distances variables selon les embouchures (*cf.* section 4.2.2), un pas de temps à la journée (*j*) a été utilisé afin d'éviter ce décalage (Figure 4.4). Dans le cas où la prise de mesure est inférieure au pas de temps journalier (minute ou horaire), la valeur maximale sur une fenêtre de 24 h est utilisée (Yu *et al.*, 2006 ; Salimi *et al.*, 2017).

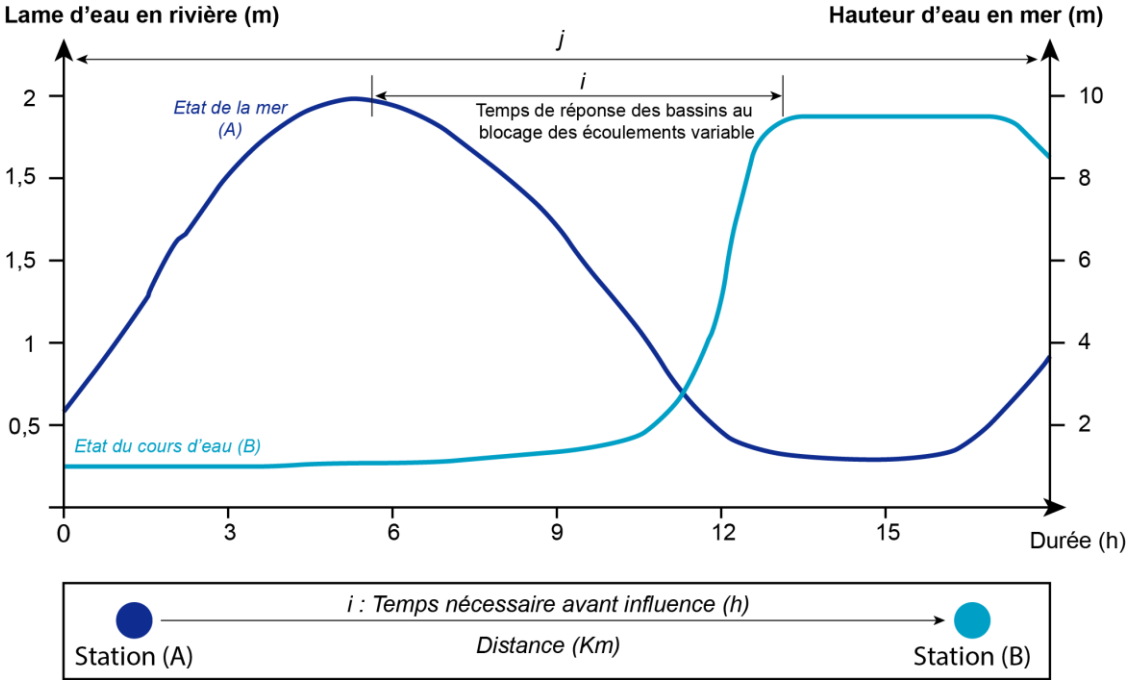


Figure 4.4 : Décalage (*i*) pouvant exister entre deux stations de mesure pour un même événement

Pour chacune des embouchures considérées, le modèle est appliqué à partir de la date du premier jour d'acquisition des données pour station hydrologique la plus proche de l'embouchure (cf. 4.2.2) et se termine le 31 décembre 2018 (avec un pas de temps journalier (*p*)[1]). Si une ou plusieurs données sont manquantes sur une journée alors la ligne entière de donnée est exclue du modèle. Le modèle RLM est appliqué sur **trois** situations hydrodynamiques :

- **Situation hydrodynamique n°1** – le modèle est appliqué sur l'ensemble des dates déterminées à partir des chroniques des stations de mesure ;
- **Situation hydrodynamique n°2** – le modèle est appliqué exclusivement sur les dates où il y a un blocage potentiel des écoulements par la mer ;
- **Situation hydrodynamique n°3** – le modèle est appliqué sur les dates où des inondations ont été inventoriées par les chercheurs et les services de l'État.

Les stations de mesure utilisées et les chroniques de données disponibles sont maintenant présentées dans la section suivante.

4.2.2. Stations et chroniques de données disponibles

La phase d'acquisition et d'harmonisation des données est une phase fondamentale au fonctionnement du modèle RLM. Pour chacune des données intégrées, nous avons identifié les stations de mesure au plus près de l'embouchure de la rivière principale, puis présenté les chroniques harmonisées à un pas de temps journalier, ainsi que les éventuels traitements devant être réalisés sur les chroniques.

4.2.2.1. Stations et chroniques des données hydrologiques

a. Localisation des stations de mesure hydrologique

Les données de la lame d'eau sont les variables dépendantes du modèle RLM (y). Afin de tenir compte des potentiels effets liés aux concomitances entre les hauteurs d'eau en mer et en rivière, les stations hydrologiques les plus en aval des bassins ont été choisis (données bancarisées dans la Banque Hydro : www.hydro.eaufrance.fr). Sur les huit stations identifiées sur la Touques, deux sont utilisées : (1) à l'aval de Pont-l'Évêque et (2) à la rue de la Licorne à Pont-l'Évêque (Tableau 4.1 et Figure 4.5).

Tableau 4.1. Caractéristiques des stations de mesure hydrologique disponibles sur la Touques

Type station	Nom station	Type de données	Interval des données	Date acquisition
Station hydro (1)	Touques (Pont-L'Evêque aval)	Débit	Quotidien	1982 - 2019
Station hydro (2)	Touques (Pont l'Evêque - Rue Licorne)	Lame d'eau	Horaire	2008 - 2019
Station hydro (3)	Calonne (Pont L'Evêque)	Lame d'eau	Horaire	2007 - 2019
Station hydro (4)	Touques (Lisieux)	Débit	Quotidien	1982 - 2019
Station hydro (5)	Touques (Mortiers-Hubert)	Débit et lame d'eau	Horaire	2010 - 2019
Station hydro (6)	Touques (Saint-Martin-de-la-Lieue)	Débit et lame d'eau	Horaire	1980 - 2019
Station hydro (7)	Calonne (Authieux-sur-calonne)	Débit et lame d'eau	Horaire	1973 - 2019
Station hydro (8)	Calonne (Bonneville-la-Louvet)	Lame d'eau	Horaire	2009 - 2019

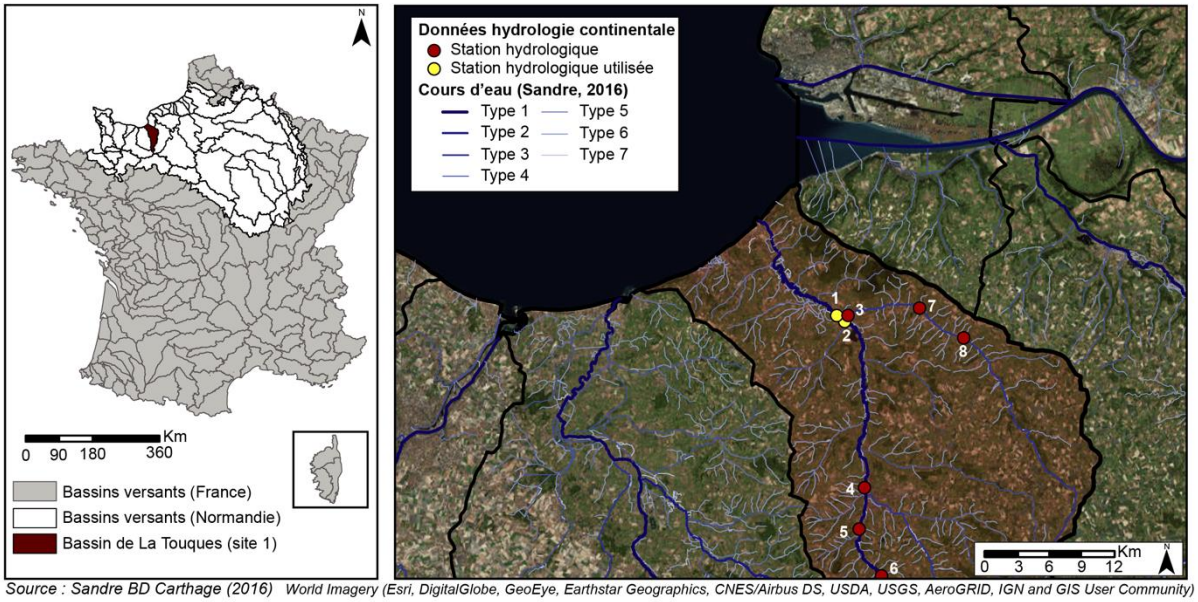


Figure 4.5 : Localisation des stations de mesure hydrologique sur La Touques

Les stations n°1 et n°2 sont géographiquement proches. Les données de débit de la station n°1 (1982 – 2019) sont couplées aux données de la lame d'eau de la station n°2 (2008 – 2019). Les données manquantes entre 1984 et 2007 étant nécessaires, elles ont été complétées par extrapolation des données de débit (coefficient de détermination >0,9) avec un modèle de régression linéaire simple [2].

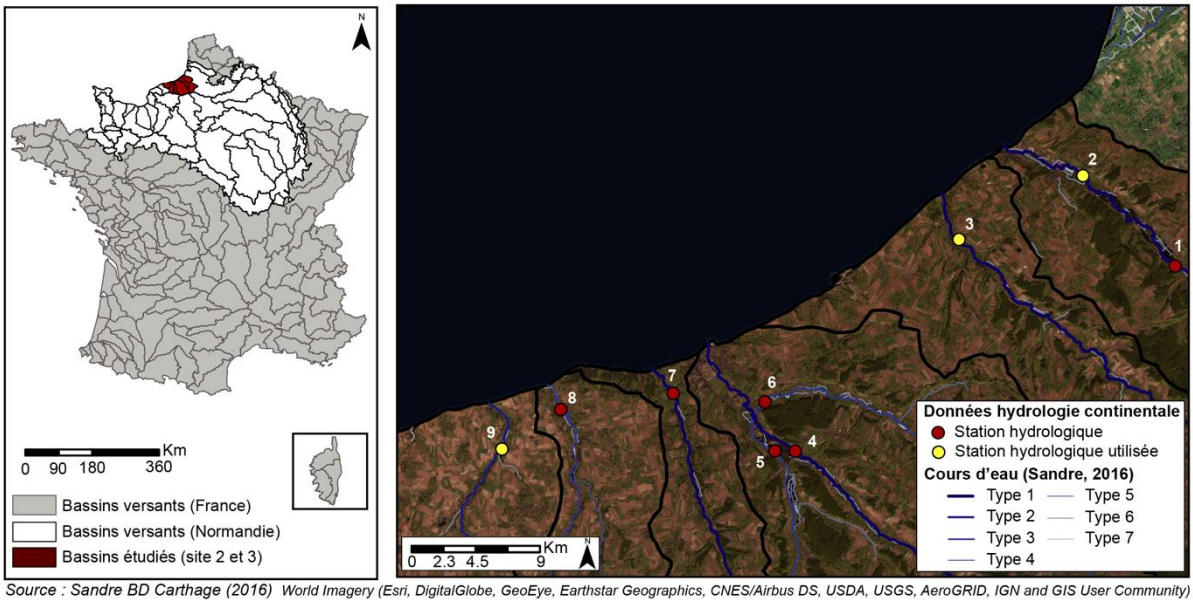
$$[2]\ Lame\ d'eau_{Touques} = 5{,}04.10^{-2}.Débit_{Touques} - 0{,}137$$

Sur les six bassins littoraux des sites n°2 et n°3 identifiés (*i.e.* d'ouest en est : Le Dun, La Saâne, La Scie, L'Arques, L'Yères et La Bresle), trois sont munis de stations hydrologiques suffisamment proches de l'embouchure pour être utilisables dans l'analyse des concomitances : le Dun, l'Yères et la Bresle (Tableau 4.2 et Figure 4.6).

Au regard des études réalisées sur l'influence des submersions marines sur le littoral normand (Costa, 1997 ; Letortu, 2013), l'orientation de la rivière à son embouchure a une influence sur la capacité des submersions marines à pénétrer dans les terres. Par conséquent, les données de lame d'eau ne sont pas extrapolées entre deux différentes embouchures en raison de l'orientation différente des bassins.

Tableau 4.2. Caractéristiques des stations de mesure hydrologique disponibles sur les embouchures entre les sites d'étude n°2 et n°3

Type station	Nom station	Type de données	Interval des données	Date acquisition
Station hydro (1)	Bresle (Longroy)	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Station hydro (2)	Bresle (Ponts-et-Marais)	Débit et hauteur d'eau	Horaire	1999 - 2019
Station hydro (3)	Yeres (Touffreville-sur-Eu)	Débit et hauteur d'eau	Horaire	1977 - 2019
Station hydro (4)	Bethune (Saint-Aubin-le-Cauf)	Débit et hauteur d'eau	Horaire	1966 - 2017
Station hydro (5)	Varenne (Martigny)	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Station hydro (6)	Eaulne (Martin-Eglise)	Débit et hauteur d'eau	Horaire	2005 - 2019
Station hydro (7)	Scie (Hautot-sur-Mer)	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Station hydro (8)	Saane (Longueil)	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Station hydro (9)	Le Dun (Bourg-Dun)	Débit et hauteur d'eau	Horaire	1995 - 2019

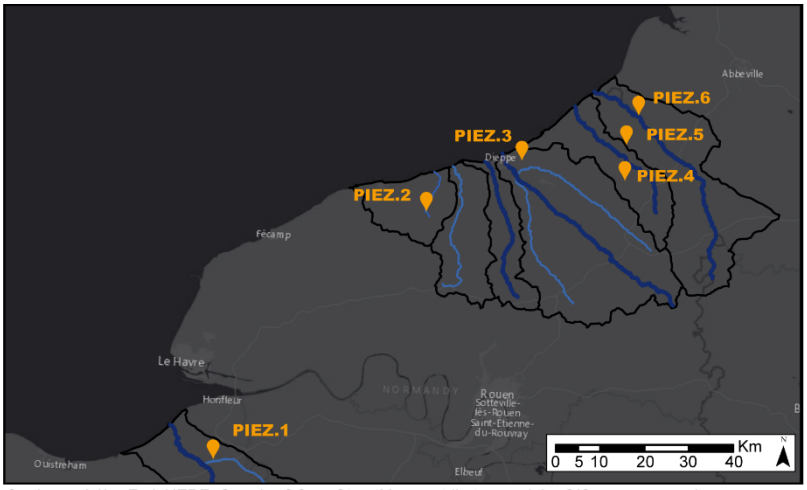


Source : Sandre BD Carthage (2016) World Imagery (Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN and GIS User Community)

Figure 4.6 : Stations hydrologiques déployées à l'embouchure des rivières sur les sites d'étude n°2 et n°3

Un suivi du niveau des nappes phréatiques est assuré par un réseau de piézomètres mis en place par l'agence de l'eau Seine-Normandie (AESN), la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), les agences régionales de santé (ARS) et les collectivités territoriales. Les données sont disponibles par le portail d'accès ADES disponible sur https://ades.eaufrance.fr/.

Six piézomètres ont été identifiés sur les trois sites d'études (Figure 4.7). Les piézomètres, les plus proches des stations hydrologiques considérées, ont été utilisés pour définir l'état de la nappe correspondant au PIEZ.1 à Surville pour la Touques, au PIEZ.2 pour le Dun, au PIEZ.5 pour L'Yères et au PIEZ.6 pour La Bresle. Les piézomètres sont situés en bas de versant ou dans la plaine alluviale sauf le PIEZ.5 qui est situé sur le plateau.



ID du piezomètre	Nom commune	Début d'acquisition
PIEZ.1	Surville (14)	05/02/1974
PIEZ.2	Fontaine -le-Dun (76)	04/11/1987
PIEZ.3	Grèges (76)	06/11/1972
PIEZ.4	Puisenval (76)	06/11/1972
PIEZ.5	Melleville (76)	15/01/2002
PIEZ.6	Beauchamps (80)	19/03/1998

Légende
- Piézomètre
- Cours d'eau d'ordre 1
- Cours d'eau d'ordre 2 et 3
- Bassin versant

Carthage, Adès, Esri, HERE, Garmin, ©OpenStreetMap contributors and the GIS user community

Figure 4.7 : Stations piézométriques disponibles sur les sites d'étude n°1 à n°3

A noter que nous avons choisi les piézomètres les plus proches des stations hydrologiques considérées sans faire l'analyse de l'influence de leur situation morphologique (situé dans la plaine alluviale, sur le versant ou bien sur le plateau) et de leur contexte structural (proximité,

ou non, des zones fracturées et faillées, natures et épaisseurs des formations traversées, etc.) sur leurs comportements (e.g. temps de réponse entre la pluie et l'élévation de la nappe, etc.).

Les données de hauteur d'eau sur La Bresle commencent en 1999 tandis que les données piézométriques ne commencent qu'en 2002. Ainsi, compte tenu des stations hydrologiques et piézométriques disponibles, les embouchures retenues pour l'analyse des concomitances sont situées sur :

(1) La Touques sur la période 1984 – 2019 (station à 13 km de l'exutoire) grâce à l'utilisation de deux stations hydrologiques géographiquement proche (> 200 m) ;

(2) Le Dun sur la période 1995 – 2019 (station à 3,75 km de l'exutoire) ;

(3) L'Yères sur la période 1984 – 2019 (station à 3,85 km de l'exutoire) ;

(4) La Bresle sur la période 1999 – 2019 (station à 5,72 km de l'exutoire).

b. Chroniques des lames d'eau et de débit

Les chroniques des stations de mesure hydrologique et le calcul du débit de base (déterminé à partir des chroniques) sont maintenant présentés. Pour chacune des stations hydrologiques, la valeur maximale instantanée de la lame d'eau et du débit instantané est déterminée sur une plage horaire de 24 heures (Figure 4.8, Figure 4.9, Figure 4.10 et Figure 4.11).

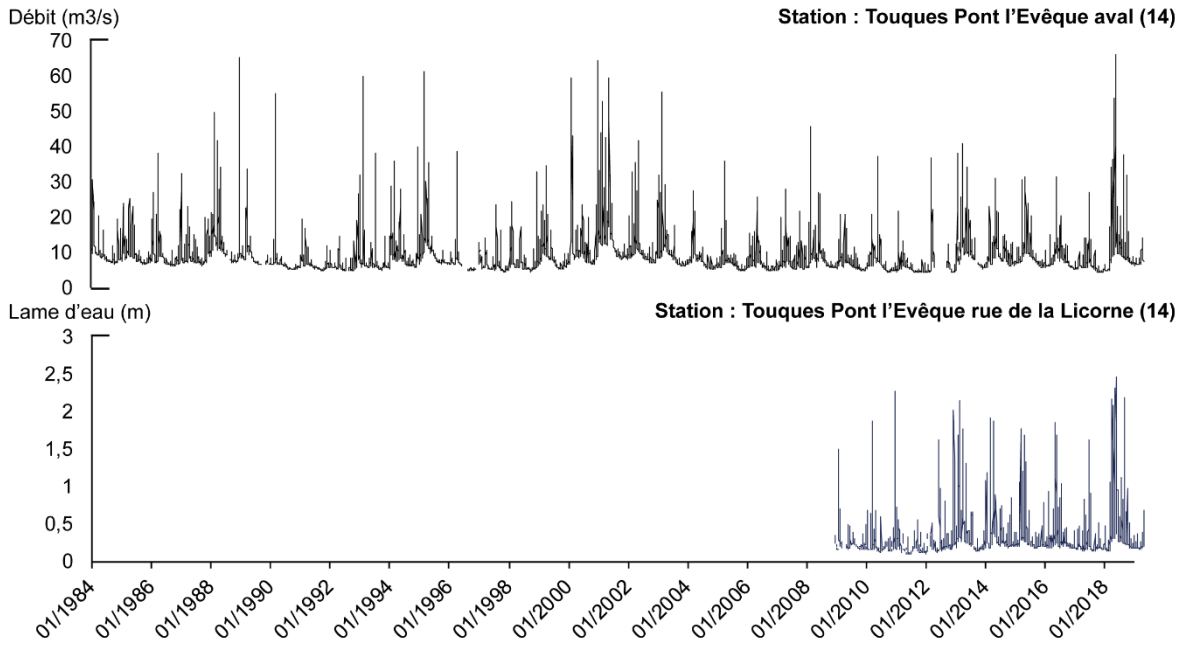


Figure 4.8 : Chroniques de débit et de lame d'eau observées à l'embouchure de La Touques

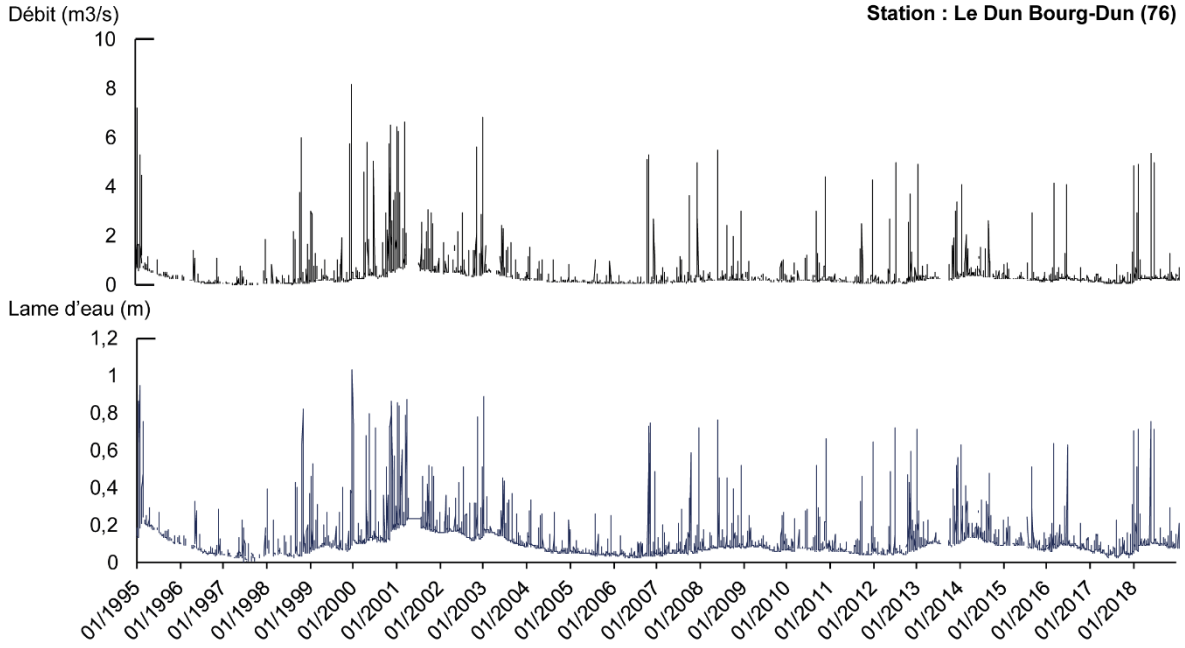


Figure 4.9 : Chroniques de débit et de lame d'eau observées à l'embouchure du Dun

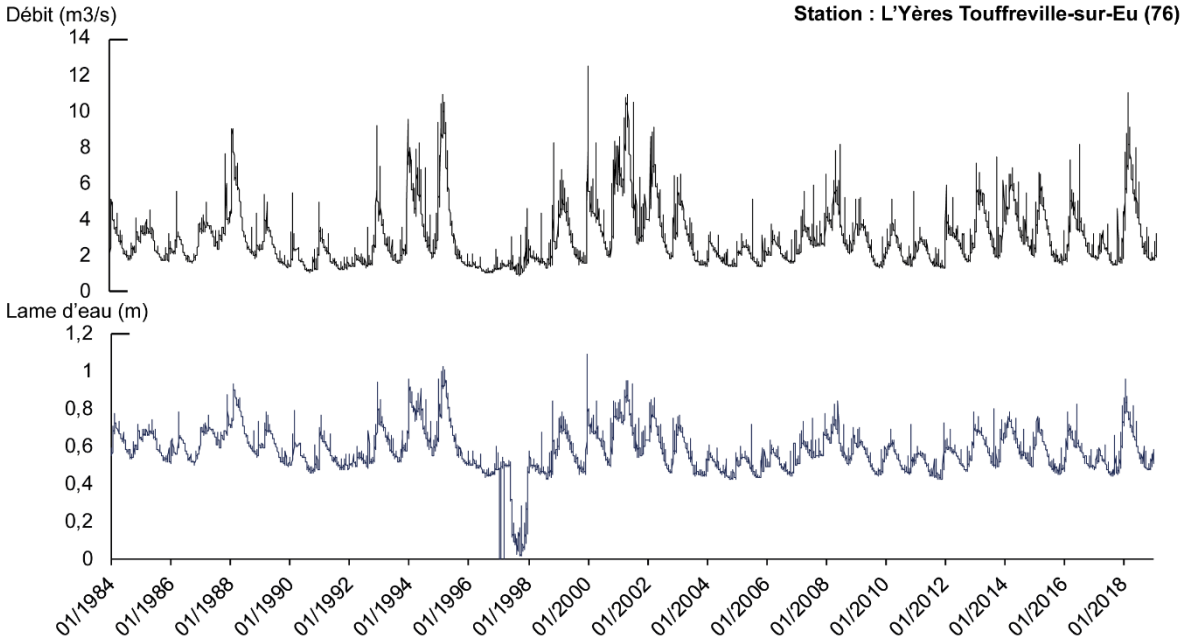


Figure 4.10 : Chroniques de débit et de lame d'eau observées à l'embouchure de L'Yères

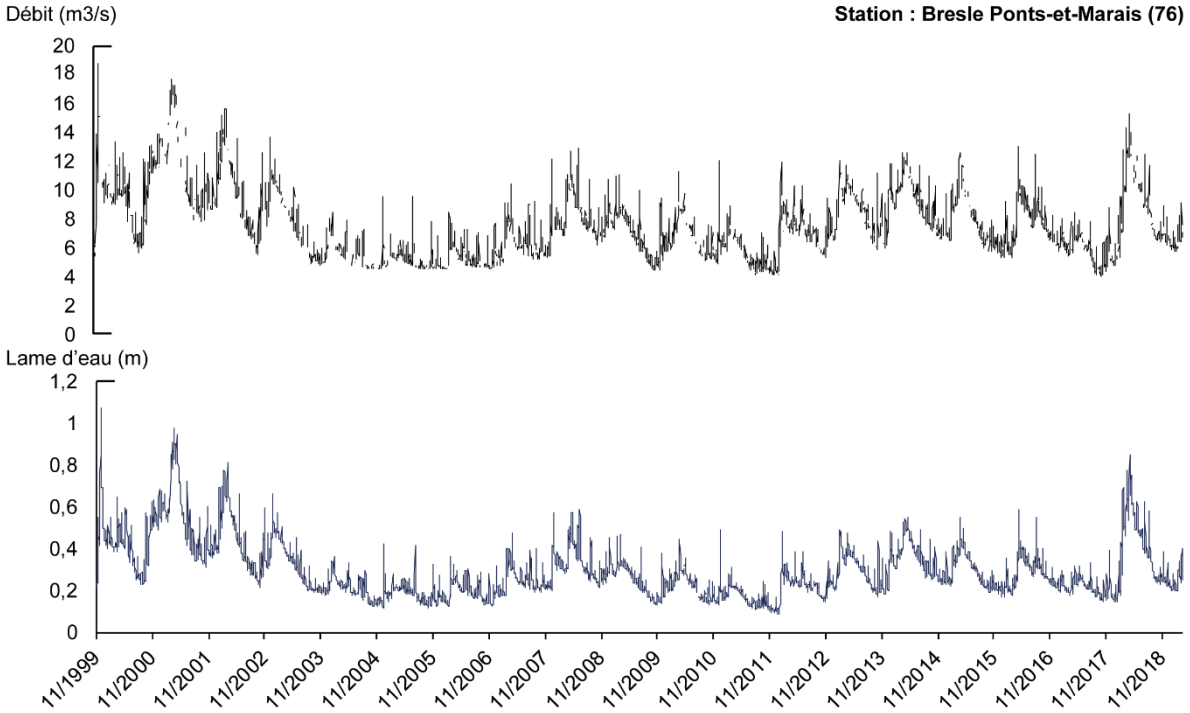


Figure 4.11 : Chroniques de débit et de lame d'eau observées à l'embouchure de La Bresle

La Touques présente des valeurs avec une amplitude variant de 8 cm (25 mai 2011) à 3,16 m (6 décembre 1988) pour la lame d'eau et de 4,28 $m^3.s^{-1}$ (27 juin 2011) à 66,2 $m^3.s^{-1}$ (22 janvier 2018) pour le débit. Les valeurs moyennes à l'embouchure sont de 30 cm pour la lame d'eau et de 8,63 $m^3.s^{-1}$ pour le débit.

Le **Dun** présente de faibles amplitudes saisonnières, avec une variation minimum de débit et de lame d'eau le 18 et 22 juin 1997 d'environ 0,2 m. Les valeurs maximales ont été enregistrées le 12 décembre 1999 avec une lame d'eau de 1,035 m et un débit de 8,15 $m^3.s^{-1}$. En moyenne, les lames d'eau sont de 0,1 m et le débit de 0,4 $m^3.s^{-1}$.

L'Yères présente de fortes amplitudes saisonnières de lame d'eau et de débit avec un minimum le 2 janvier 1997 enregistrant 0,13 cm de lame d'eau et le 22 septembre 1997 enregistrant 0,89 $m^3.s^{-1}$ de débit. Les valeurs les plus fortes enregistrées sont de 1,09 m et de 12,5 $m^3.s^{-1}$ le 26 décembre 1999 durant la **tempête Lothar**. Les valeurs moyennes enregistrées sont de 0,6 m pour la lame d'eau et de 2,85 $m^3.s^{-1}$ pour le débit.

La Bresle présente de fortes amplitudes saisonnières avec des lames d'eau maximales instantanées de 0,86 cm le 25 novembre 2011 et un débit de 4,04 $m^3.s^{-1}$ enregistré le 22 juillet 2017. Les valeurs maximales datent du 28 décembre 1999, durant la **tempête Martin**, avec 1,08 m de lame d'eau et 18,8 $m^3.s^{-1}$ de débit. Les valeurs moyennes sont de 0,30 m pour la lame d'eau et de 7,5 $m^3.s^{-1}$ pour le débit.

Pour deux des quatre stations hydrologiques, L'Yères et la Bresle, les plus hautes valeurs de la lame d'eau ont été enregistrées le 28 décembre 1999 **durant la tempête Martin, suggérant un cas de concomitance**. La Touques enregistre ces plus fortes valeurs de la lame d'eau sur une vingtaine de jours après la tempête Eleanor et le Dun une dizaine avant la tempête Lothar. L'explication de variation de ces lames d'eau doit considérer, dans un premier temps, les valeurs des niveaux piézométriques (Figure 4.12) ainsi que celles du débit de base.

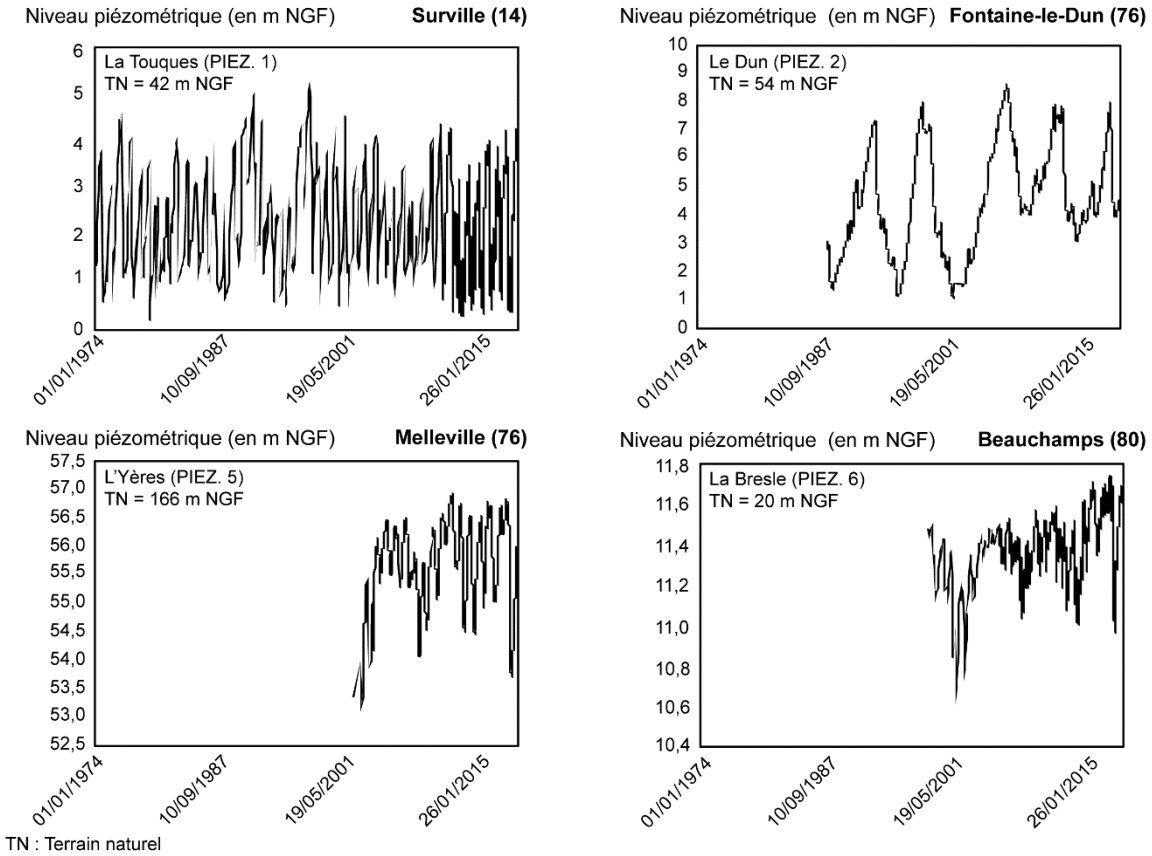


Figure 4.12 : Variations des niveaux piézométriques mesurés sur les stations de Surville (La Touques), de Fontaine-le-Dun (le Dun), Melleville (L'Yères) et de Beauchamps (La Bresle)

Les débits sont calculés à partir de la vitesse d'écoulement ainsi que de la section mouillée et intègrent donc les lames d'eau. Pour éviter que la réponse de la variable dépendante (*i.e.* hauteur d'eau) ne soit également intégrée en tant que variables explicatives. Cependant, un calcul du débit de base permet d'intégrer l'état du cours d'eau sur un intervalle de temps donné en tant que variable explicative.

c. *Calcul du débit de base*

Plusieurs méthodes existent pour calculer le débit de base d'un cours d'eau. Sloto et Crouse (1996) proposent trois algorithmes pour séparer le débit de base du débit total. Ces trois méthodes ont été appliquées à l'embouchure de La Touques afin de déterminer la méthode la plus adaptée. Les méthodes *Fixed Interval Method* (*FIM*) [3], *Sliding Interval Method* (*SIM*) [4] et *Local Minimum Method* (*LMM*) [5] sont appliquées sur une période de 30 ans et avec une fenêtre temporelle de 5 jours *via* les modules fournis en libre accès sur https://hydrooffice.org/.

$$[3]\ FIM \rightarrow\ q_b(t_0) = min\,\{Q_t, t \in [t_0 + \tau - 1]\}$$

$$[4]\ SIM \rightarrow\ q_b(t) = min\{Q_t, t \in [t - t', t + t']\}$$

$$[5]\ LMM \rightarrow\ q_b(t) = min[t - t', t + t'] \rightarrow y = ax + b$$

Le coefficient de détermination (R^2) est calculé par comparaison avec les débits maximums instantanés (Tableau 4.3). Avec un indice de 0,962, la méthode SIM a été retenue pour le calcul

du débit de base et appliquée au Dun, à L'Yères et à La Bresle. Un extrait de l'application de ces trois méthodes est présenté ci-dessous (Figure 4.13).

Tableau 4.3. Coefficient de détermination (R^2) des méthodes de calcul du débit de base

Méthode	*FIM*	*SIM*	*LMM*
R^2	0,925	0,962	0,916

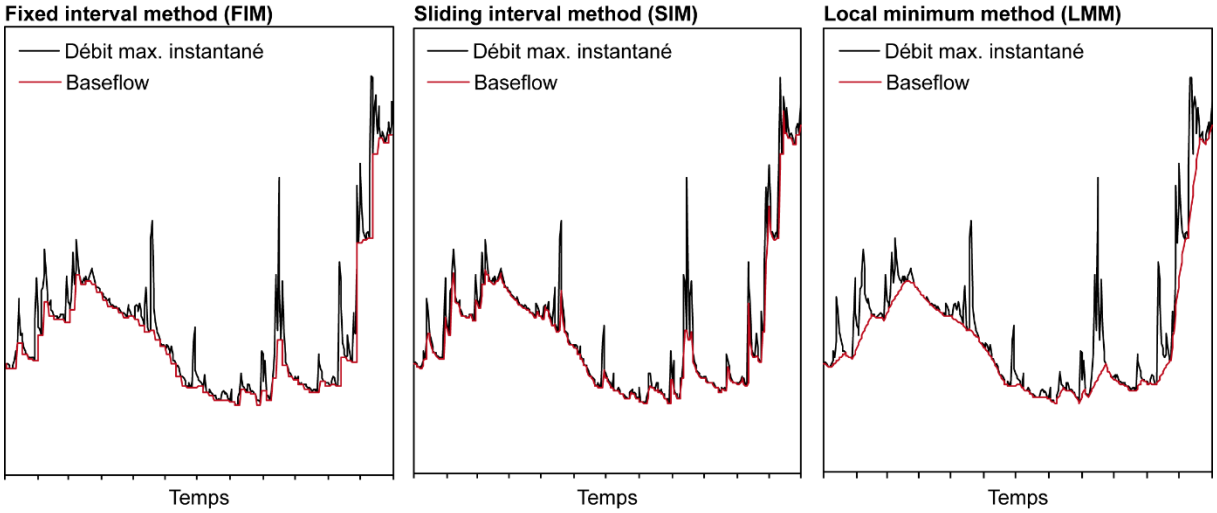


Figure 4.13 : Résultats des calculs du débit de base (*baseflow*) sur un extrait des chroniques de La Touques obtenues avec les trois méthodes *Fixed Interval Method* (FIM), *Sliding Interval Method* (SIM) et *Local Minimum Method* (LMM)

Les données piézométriques et de débit de base (pas de temps journalier) constituent les deux variables hydrologiques explicatives.

4.2.2.2. Stations et chroniques des données marines

a. Stations marégraphiques

Les variables marines sont les données de hauteurs de mer observées (Hem Obs.), les hauteurs de mer prédites (Hem P), les surcotes marines (S), ainsi que la durée de blocage potentiel des écoulements pour un niveau marin donné. Les marégraphes du port du Havre et du port de Dieppe sont utilisés pour déterminer les valeurs de hauteurs de mer observées[3] (Figure 4.14). Le lecteur pourra trouver un descriptif complet et synthétique de ces stations marégraphiques dans « *Dynamiques et évolution du littoral : Synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague* » (Cerema, 2019)[4].

Le service hydrographique et océanique de la marine (SHOM) fournit les données de hauteur de mer modélisée en tenant compte de la force et de la direction des vents, des pressions atmosphériques, de la force gravitationnelle (e.g. syzygie), des courants de marée, de la bathymétrie, etc. (Desmare et Nicolle, 2012)[5]. La hauteur d'eau maximale en mer modélisée à la journée a été retenue dans l'intégration du modèle.

[3] *Données marégraphiques disponibles sur http://refmar.shom.fr/*
[4] *Disponible en téléchargement sur https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/dynamiques-evolution-du-littoral-fascicule-3-du-cap-antifer*
[5] *Données modélisées de hauteur d'eau en mer disponible sur https://maree.shom.fr/*

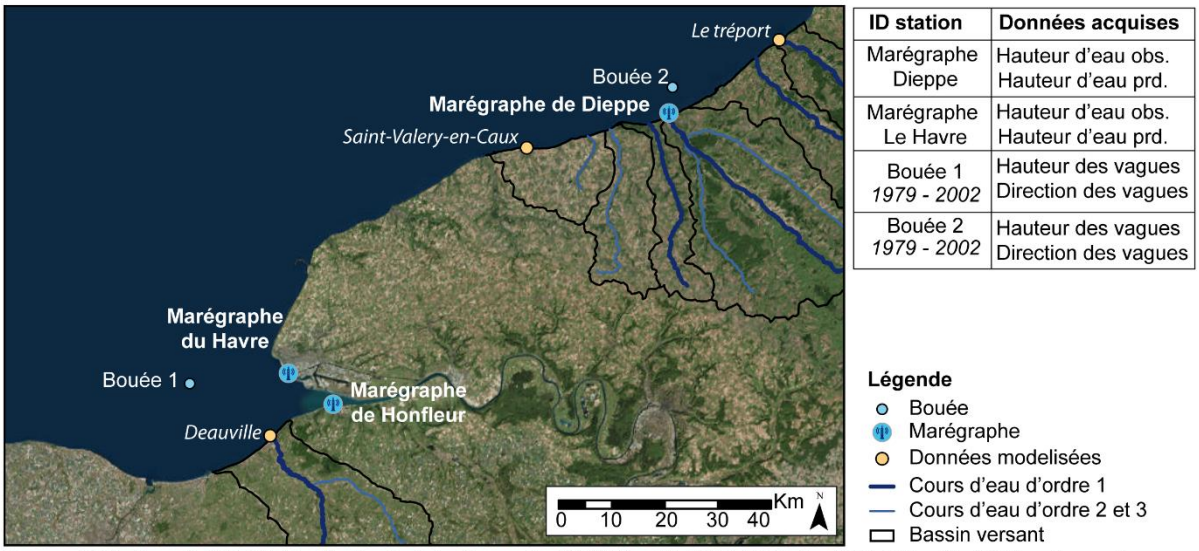


Figure 4.14 : Localisation des marégraphes et des bouées de mesure des vagues entre Deauville et le Tréport

Les données de hauteur et de direction des houles ont été enregistrées sur la période de 1979 – 2002 et par conséquent n'ont pas été intégrées au modèle RLM. La durée de blocage potentielle des écoulements est calculée à partir des données marégraphiques (hauteur de mer observée) harmonisées au pas de temps horaire. Pour des raisons de comparaison, les hauteurs d'eau en mer sont données selon le zéro hydrographique (ZH – *cf.* chapitre 1).

Le marégraphe du Havre et les hauteurs de mer modélisées à Deauville ont été utilisés pour la détermination des variables marines à l'embouchure de la basse vallée de La Touques. Le marégraphe de Dieppe a été utilisé pour la détermination des hauteurs de mer observées à l'embouchure de la basse vallée du Dun, de L'Yères et de la Bresle. Les données des hauteurs de mer modélisées à Saint-Valéry-en-Caux sont utilisées pour les hauteurs de mer prédites à l'embouchure du Dun. Les hauteurs de mer prédites au Tréport ont été utilisées pour les embouchures de L'Yères et de La Bresle. Les chroniques de hauteurs d'eau en mer, de surcote et de la durée potentielle de blocage sont présentées dans la suite de cette section.

b. Chroniques de hauteurs d'eau et surcotes en mer

Malgré quelques absences de données à la journée, les chroniques du port du Havre sont relativement complètes. Les manques de données les plus marquants s'étendent du 9 août 1984 au 2 janvier 1985, entre le 24 février 1993 et le 22 avril 1993 puis entre le 10 janvier 2018 et le 1er juillet 2018 (Figure 4.15). La surcote en mer est calculée par différence entre les hauteurs d'eau observées et prédites en mer.

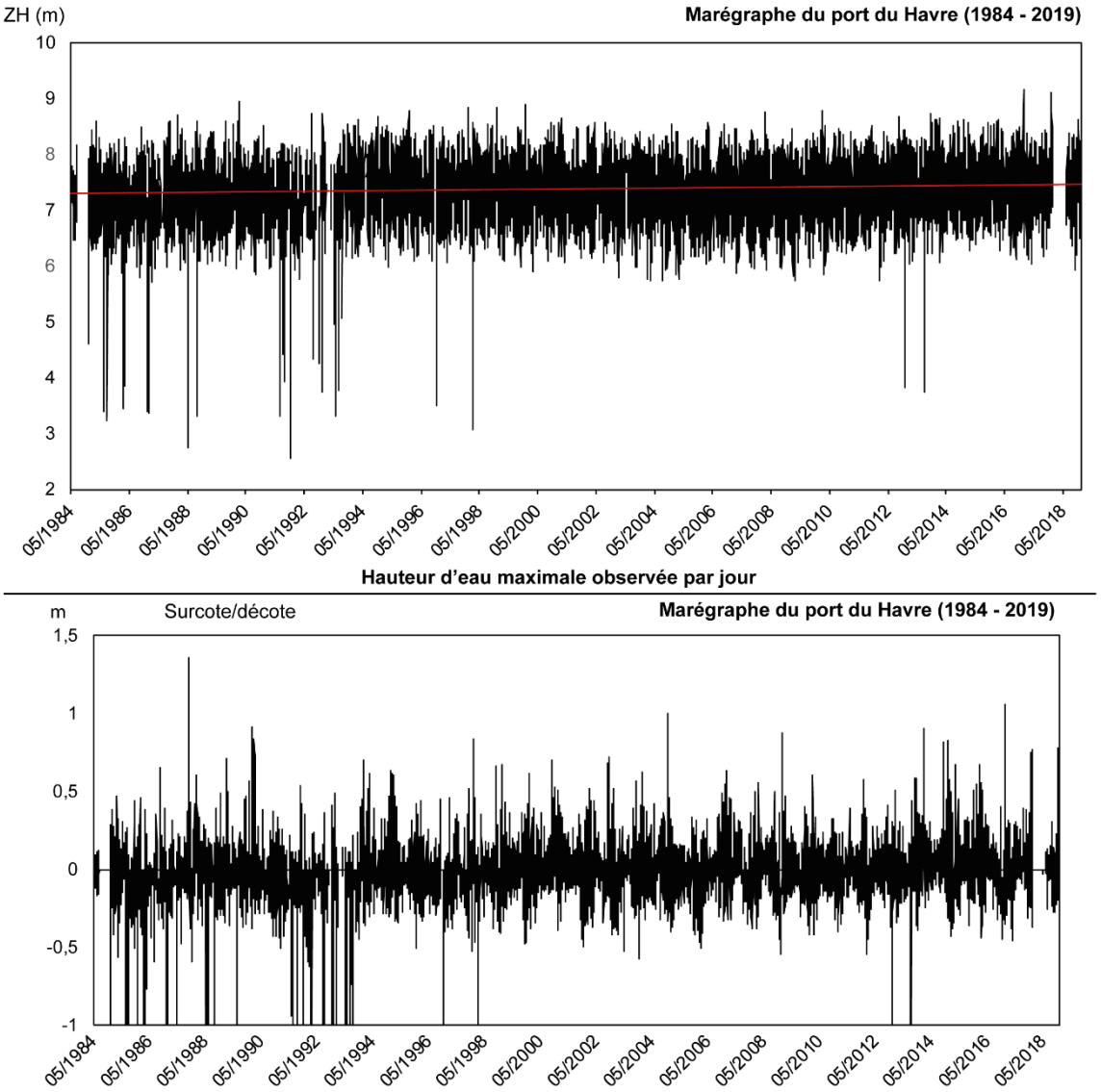


Figure 4.15 : Chroniques de hauteurs d'eau observées en mer et surcote en mer calculée au marégraphe du port du Havre (où ZH = zéro hydrographique)

Les hauteurs de mer observées et de décotes les plus faibles, de 2,55 m ZH et de - 4,79 m, ont été enregistrées le 28 novembre 1991. Les hauteurs d'eau maximale observées datent du 12 janvier 2017 (tempête Egon) et du 3 janvier 2018 (tempête Eleanor) avec respectivement 9,14 m ZH et 9,10 m ZH. Les surcotes les plus importantes datent du 16 octobre 1987 avec + 1,36 m de surcote, du 12 janvier 2017 avec + 1,05 m de surcote (tempête Egon) et du 3 février 1990 avec + 1 m de surcote (tempête Herta). Les hauteurs d'eau observées ont une valeur moyenne de 7,40 m ZH.

Le marégraphe de Dieppe présente des absences de données assez importantes entre le 30 décembre 1985 et le 5 septembre 1987, entre le 4 août 1989 et le 30 décembre 1992, entre le 31 décembre 1994 et le 30 décembre 2000 puis entre le 2 août 2007 et le 8 février 2009. En raison de sa proximité avec l'estuaire de la Seine et de son effet de site, les données observées au port du Havre n'ont pas été extrapolées sur le port de Dieppe. Pour les événements de tempêtes majeures (cf. section 4.3.1), les données prédites par le SHOM ont été utilisées comme valeurs de référence (Figure 4.16).

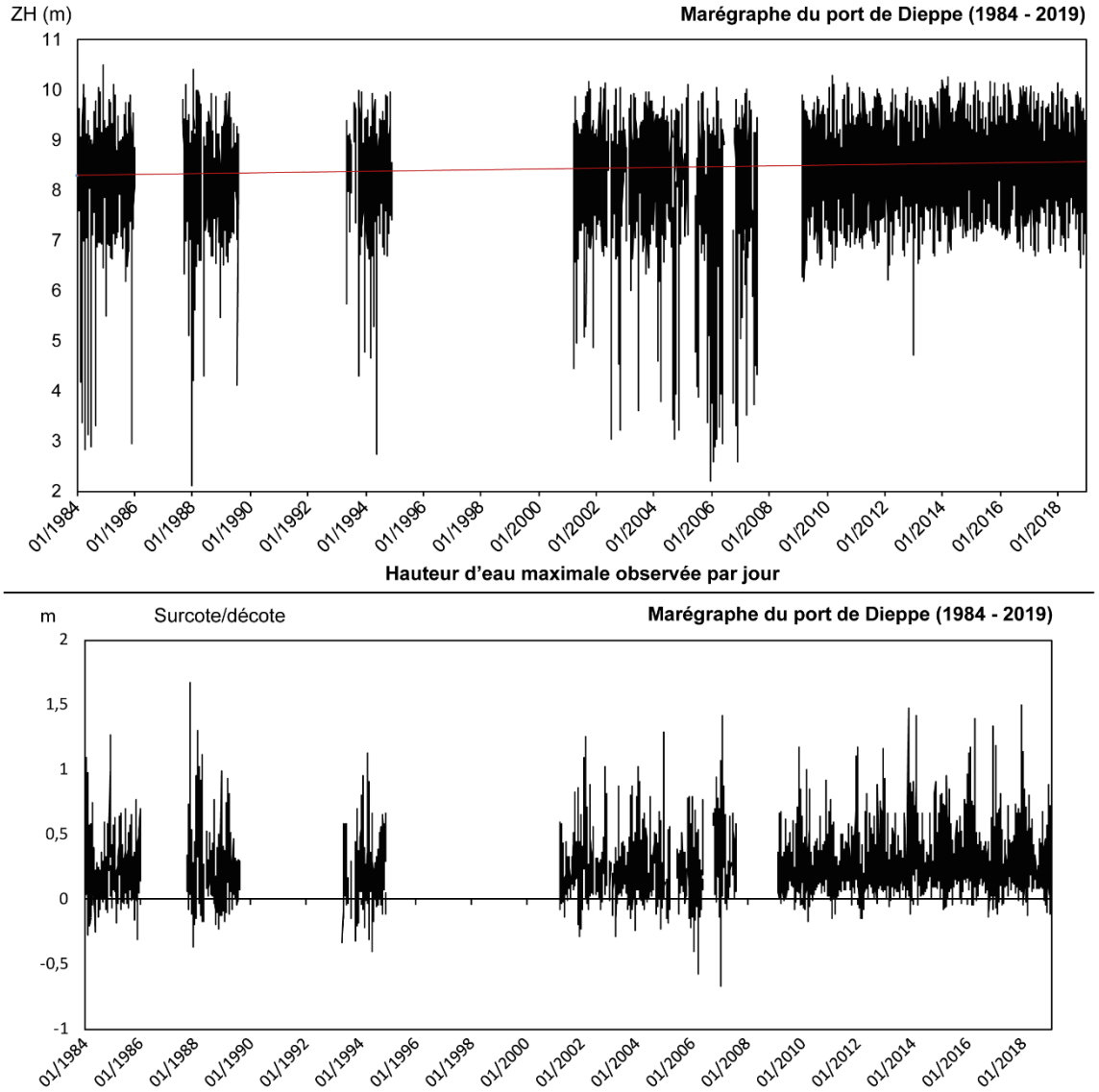


Figure 4.16 : Chroniques de hauteurs d'eau observées en mer et surcote en mer calculée au marégraphe du port de Dieppe (où ZH = zéro hydrographique)

Sur le marégraphe de Dieppe, les hauteurs d'eau en mer les plus faibles ont été observées le 30 décembre 2018 avec 2,1 m ZH. La décote la plus importante se produit le 21 janvier 2007 avec différence - 0,67 m par rapport à la hauteur d'eau en mer prédite. Les maximums de hauteurs d'eau en mer observées sont enregistrés sur le marégraphe le 22 novembre 1984 avec 10,5 m ZH et la surcote la plus forte est observée le 15 octobre 1987 avec + 1,67 m. Une analyse des submersions de tempêtes (cf. 4.2.3) a montré que les hauteurs en mer observées au port de Dieppe ont été de 10,05 m ZH pendant les tempêtes du 27 et 28 février 1990 (tempête Viviane et Wiebeke) avec une surcote de + 0,7 m (rapport PPR littoral de la basse vallée de La Scie – DDTM, 2016).

c. Détermination de la durée de blocage potentielle de l'écoulement des rivières par la mer

En complément des données sur les hauteurs de mer observées et prédites et de surcote, la durée de blocage potentielle des écoulements a été estimée. Dans ce cas, le postulat considère que la pression des volumes d'eau exercée par la mer (partiellement accentuée par les masses volumiques d'eau salée, ρ = 1 025 kg.m³ contre ρ = 1 000 kg.m³ pour l'eau douce) empêche l'écoulement normal des rivières littorales à leur embouchure (Wassmann *et al.*, 2004 ; Shen *et*

al., 2018). On émet l'hypothèse que ce blocage des écoulements commence lorsque le niveau de marée atteint un **niveau de pleine mer et de vives-eaux** selon les différentes stations marégraphiques des ports du Havre et de Dieppe (SHOM, 2017). Ce seuil a été considéré, car dans les ports de Dieppe et de Mers-les-Bains, un clapet de régulation des écoulements se ferme et empêche l'écoulement des embouchures dans la mer à partir d'un niveau de marée de vives-eaux. Cette hypothèse peut cependant avoir ses limites en l'absence d'éléments prouvant le réel effet de blocage des écoulements par la mer. Pour rappel, les seuils marégraphiques sont présentés ci-dessous (Tableau 4.4).

Tableau 4.4. Seuils marégraphiques au port du Havre et de Dieppe selon le SHOM (2017)

	Marégraphe du Havre		**Marégraphe de Dieppe**	
	ZH (m)	**Z NGF (m)**	**ZH (m)**	**Z NGF (m)**
Niveau marin centennal	**9,88**	**5,5**	**14,34**	**9,89**
Niveau des plus hautes mers astronomiques	8,56	4,18	10,11	5,66
Niveau de pleine mer de vives-eaux	8	3,62	9,35	4,89
Niveau de pleine mer de mortes-eaux	6,7	2,32	7,4	2,95
Niveau moyen	**4,96**	**0,58**	**4,94**	**0,49**

Avec ZH (référence altimétrique par rapport aux plus basses mers) et Z NGF (référence altimétrique par rapport au zéro IGN 69)

Le calcul de la durée de blocage des écoulements est fondé sur les valeurs maximales de hauteurs d'eau observées en mer avec une harmonisation au pas de temps horaire (Figure 4.17).

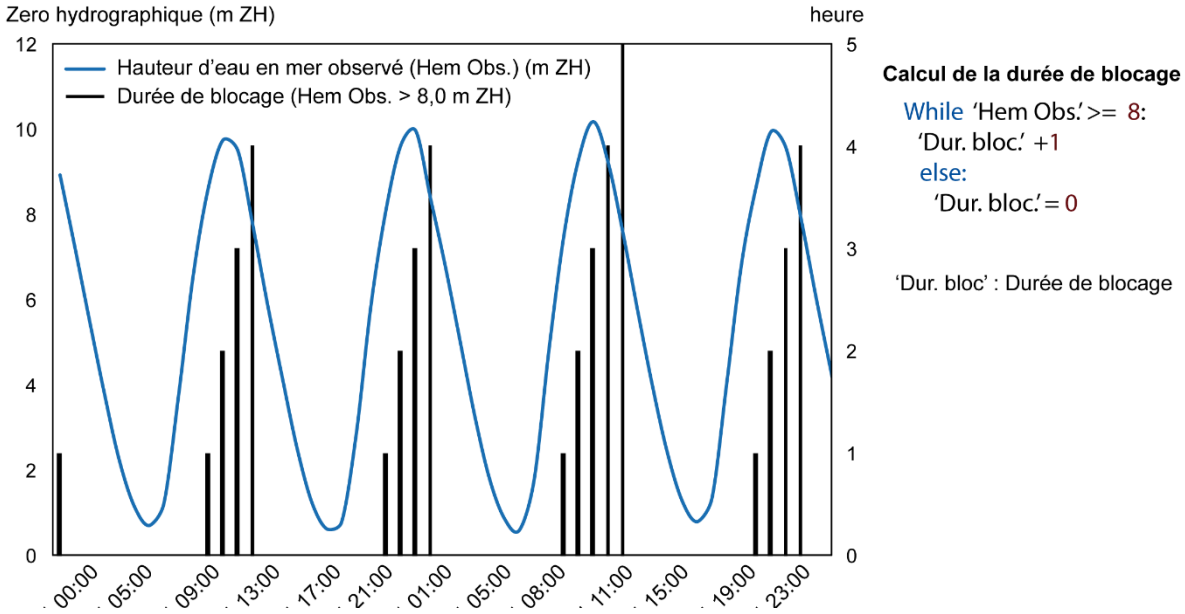


Figure 4.17 : Calcul du cumul de la durée de blocage potentiel des écoulements

Un script python a été développé pour déterminer le cumul des durées de blocage maximales sur une journée. Tant que (fonction : *While*) les hauteurs d'eau observées sont supérieures à un niveau de marée de pleines mers et de vives eaux, le script incrémente + 1 heure de durée de blocage. Si les hauteurs d'eau deviennent inférieures à ce seuil (fonction : *Else*), le cumul de la durée de blocage potentielle est réinitialisé à zéro.

Une fois le script exécuté, la valeur de cumul maximum sur une fenêtre temporelle de 24 heures a été retenue pour être intégrée au modèle RLM. Les durées de blocage potentiel des écoulements sont les plus longues sur le marégraphe du Havre avec un maximum de cinq heures le 27 mai 2014 et le 21 juillet 1990, et sur le marégraphe de Dieppe, avec un maximum de trois heures le 25 novembre 1984 (Figure 4.18 et Figure 4.19).

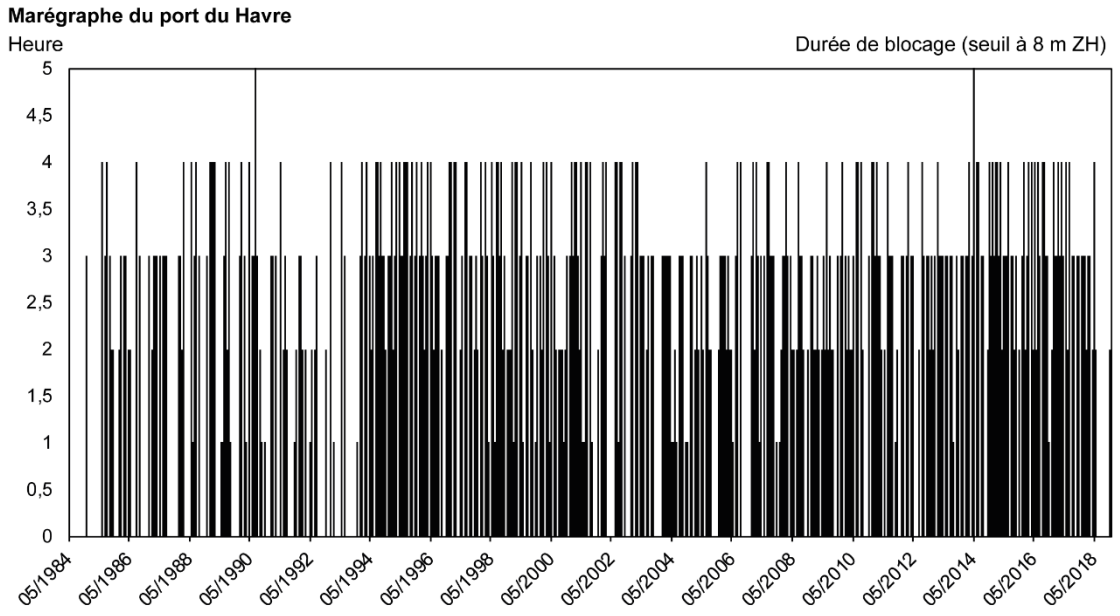


Figure 4.18 : Résultats du calcul des durées de blocage potentiel après harmonisation de la fenêtre temporelle sur le marégraphe du port du Havre (valeur maximum de cumul de la durée de blocage à la journée)

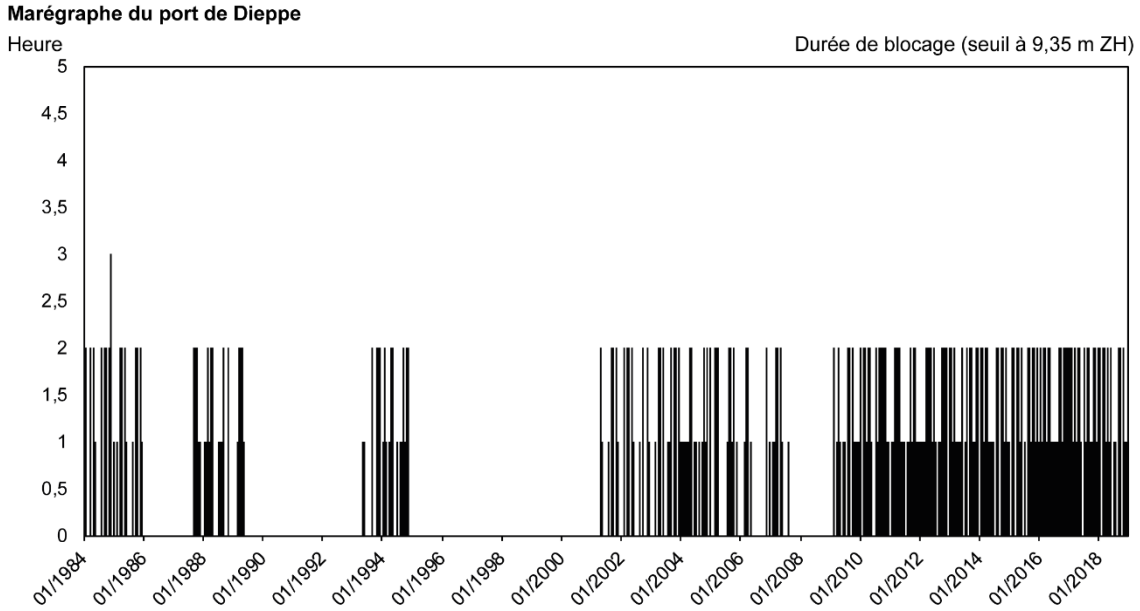


Figure 4.19 : Résultats du calcul des durées de blocage potentiel après harmonisation de la fenêtre temporelle sur le marégraphe du port de Dieppe (valeur maximum de cumul de la durée de blocage à la journée)

Les durées de blocage potentiel des écoulements plus longues et plus récurrentes sur le marégraphe du Havre s'expliquent par sa position près de l'estuaire de la Seine. L'estuaire de la Seine produit un effet de site par résonnance de la marée augmentant ainsi les durées des marées de pleine mer et de vives-eaux accentuées par les niveaux d'eau à l'estuaire de la Seine (Fisson *et al.*, 2014 ; Fisson et Lemoine, 2016). Les variables hydrologiques (niveaux piézométriques, débits de base) et les variables marines (hauteurs d'eau en mer observées, prédites, surcotes et durées de blocage) sont couplées aux variables météorologiques et présentées dans la suite de cette section.

4.2.2.3. Stations et chroniques des données météorologiques

a. Stations de mesure météorologique

Les conditions météorologiques à un pas de temps quotidien ont été déterminées sur la base des données fournies par les stations météorologiques mises en place par Météo France à Saint-Gatien-des-Bois, à Dieppe et à Caen (Figure 4.20).

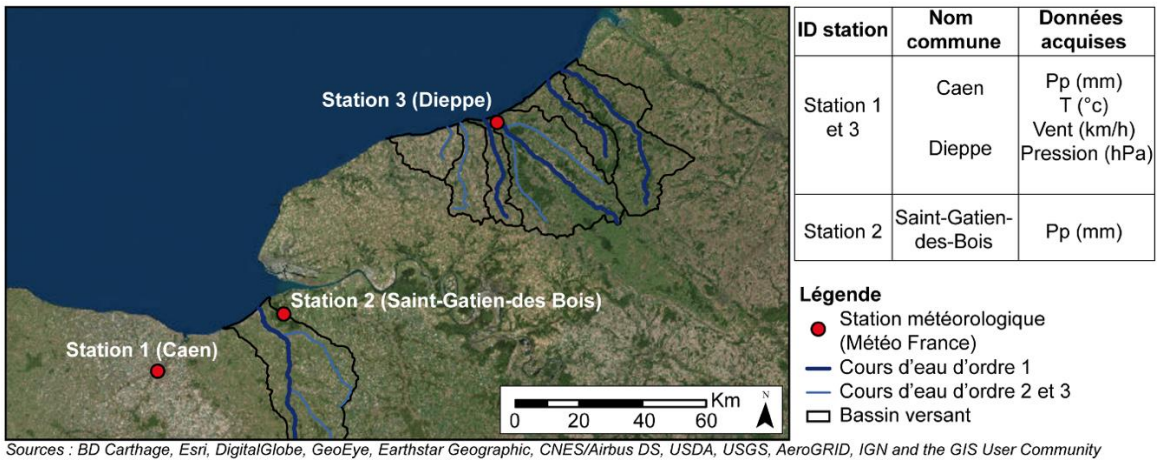


Figure 4.20 : Localisation des stations météorologiques du réseau Météo France

Les bilans hydrologiques (réserve utile, surplus hydrologique, etc.), ainsi que les précipitations efficaces ont été calculés par Olivier Cantat (UCN, 2019). Les données liées à l'évapotranspiration (humidité, ensoleillement, etc.) sont considérées par Cantat *et al.* (2002) comme homogènes sur l'ensemble du littoral normand en considérant la station météorologique de Caen comme station de référence. Les variables météorologiques comprennent les précipitations (PP), les précipitations efficaces (PP.Q) et le cumul des précipitations efficaces sur une fenêtre glissante de sept jours (PP.Q cum.), l'état de saturation des sols considérés à travers l'état de la réserve utile (RU), la reconstitution de la réserve utile (RRU), le chargement de la réserve utile à la journée (CHRU), ainsi que le surplus hydrologique (Sh). Les formules utilisées pour la détermination de ces variables sont présentées dans la suite de cette section.

b. Chroniques météorologiques

Les deux stations présentent des chroniques météorologiques avec des tendances relativement semblables, mais avec une tendance légèrement plus froide et avec de plus faibles précipitations pour la station de Dieppe par rapport à la station de Saint-Gatien-des-Bois (en moyenne + 10 mm d'eau en mois mensuellement et – 0,7°C). Les précipitations totales maximales ont été enregistrées à la station de Saint-Gatien-des-Bois le 1er juin 2003, où des inondations, crues turbides et glissements de terrain se sont simultanément déclenchés, avec des précipitations égales à 71,8 mm en une journée (Figure 4.21). Les précipitations efficaces maximales atteignent 31,3 mm le 13 novembre 2010 et un cumul de précipitations efficaces (sept jours consécutifs) de 95,3 mm a été enregistré le 10 octobre 1982, sans provoquer d'inondation ou de crue turbide à ces dates[6] (Figure 4.22). Les surplus hydrologiques (RRU, CHRU et RU) les plus importants ont été observés les 13 novembre 2010 (57,6 mm sans événement enregistré), 15 octobre 2004 (43,2 mm sans événement enregistré), 1er juin 2003 (42,7 mm avec des inondations, glissements

[6] *Inventaire des événements historiques (inondations, crues turbides, tempêtes, etc.) réalisé dans la section 4.2.3.*

de terrain et crues turbides), et le 7 novembre 2000 (42,4 mm avec des inondations et crues turbides) (Figure 4.23).

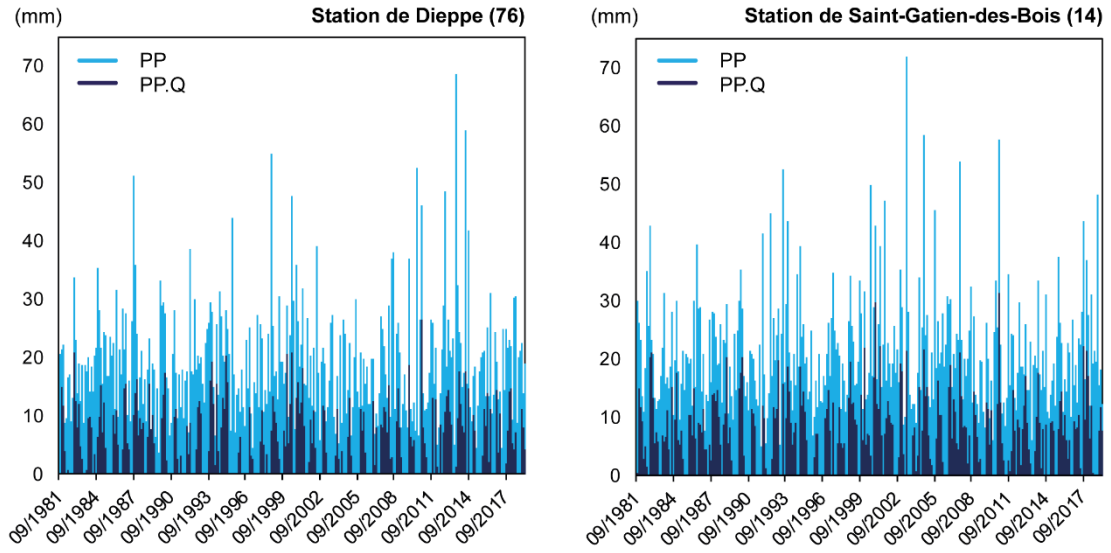


Figure 4.21 : Précipitations (PP) mesurées et précipitations efficaces (PP.Q) calculées aux stations météorologiques de Dieppe et de Saint-Gatien-des-Bois

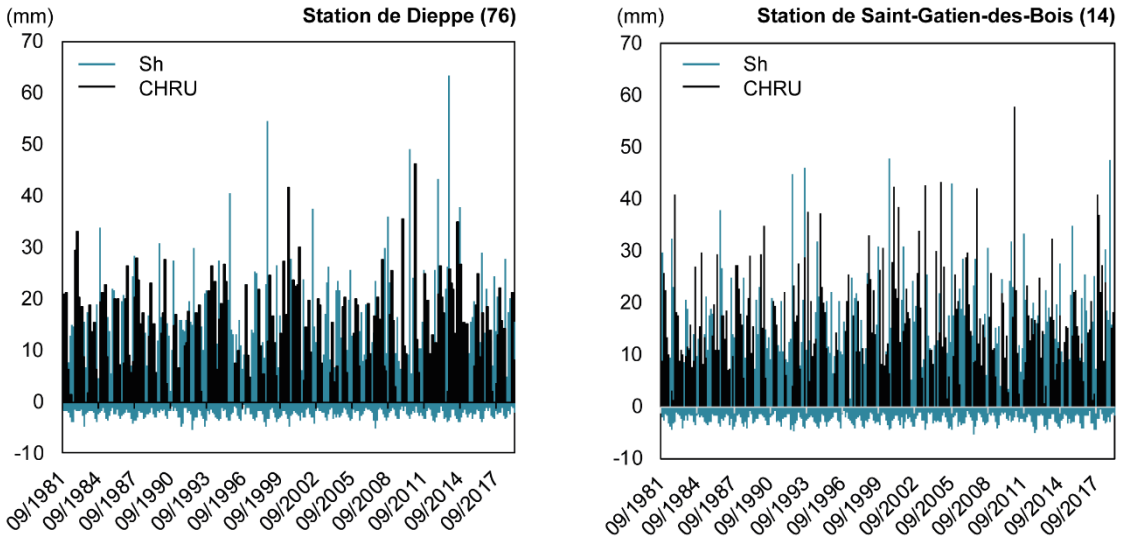


Figure 4.22 : Chargement de la réserve utile (CHRU) et surplus hydrologiques (Sh) calculés aux stations météorologiques Météo France de Dieppe et de Saint-Gatien-des-Bois

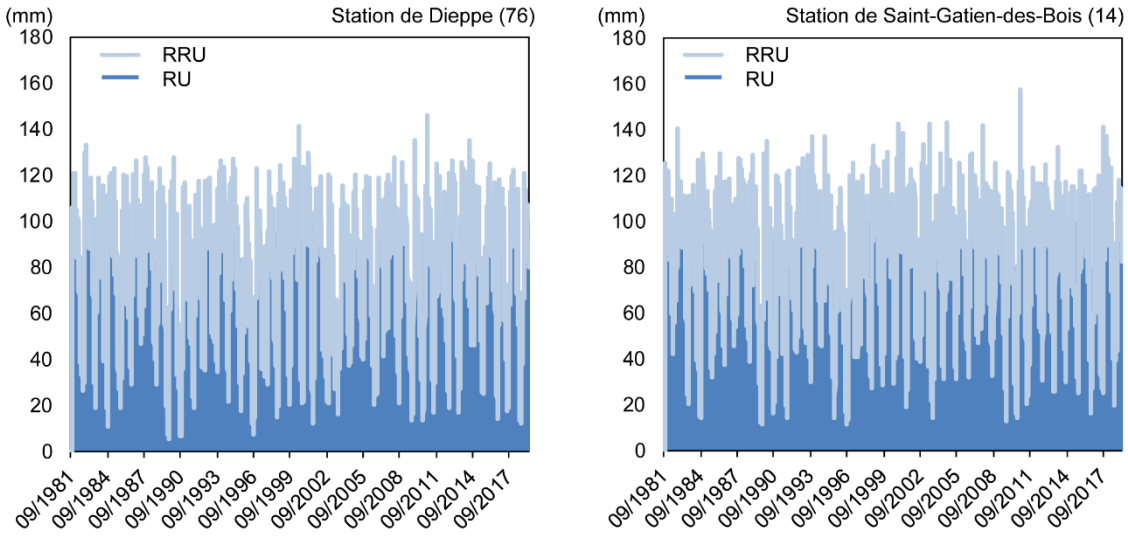


Figure 4.23 : Réserve utile (RU) et reconstitution de la réserve utile (RRU) calculées aux stations météorologiques Météo France de Dieppe et de Saint-Gatien-des-Bois

Les précipitations totales maximales ont été enregistrées à la station de Dieppe le 24 août 2013 avec 68,6 mm de PP, mais sans événement référencé (Figure 4.21). Les PP.Q. maximales à la journée ont été enregistrées avec 26,5 mm le 13 novembre 2010 (sans événement référencé), avec 21 mm le 13 novembre 1982 (sans événements référencés) et avec 20,9 mm le 7 mai 2000 avec une inondation généralisée sur l'ensemble des embouchures de Seine-Maritime. Les cumuls de PP.Q les plus importants ont été enregistrés les 18 et 19 novembre 1982 avec respectivement 84,3 et 82,5 mm (sans événement référencé) et le 24 décembre 1993 (inondation identifiée) avec 80 mm de précipitation. Les surplus hydrologiques les plus importants ont été enregistrés le 13 novembre 2010 (sans événement référencé) avec 46 mm et le 7 mai 2000, avec 41,6 mm de surplus, où des inondations généralisées ont marqué les embouchures des vallées littorales (Figure 4.22 et Figure 4.23).

c. *Calcul du bilan hydrique et hydrologique*

Le bilan hydrique est calculé à partir des précipitations (PP), de l'évapotranspiration (ET) et de la réserve utile (RU). Le calcul de l'ET est issu de la formule de Pennman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) :

$$[6]\ ET_i = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34u_2)}$$

Où Et_i est l'évapotranspiration de référence à un instant i (mm), R_n est la radiation nette à la surface du sol (MJ.m^{-2}.jour^{-1}), T est la moyenne de la température de l'air à une hauteur de 2 m (°C), u_2 est la vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (m.s^{-1}), e_s est la pression de la vapeur d'eau (kPa), e_a est la pression de la vapeur d'eau déficitaire (KpA), Δ est la courbe de pression de vapeur (kPa.°C^{-1}) et γ est la constante psychométrique (kPa.°C^{-1}). Les flux de chaleur du sol ont une valeur de G = 0 dans l'application journalière de l'ET. En raison de la superficie (> 100 km^2) des bassins versants et dans un souci de simplification des modèles, une capacité de réserve utile totale (RU_t) standard de 100 mm a été utilisée (cette dernière pouvant varier généralement de 50 à 200 mm selon le contexte géographique) (Jamagne *et al.*, 1977 ; Jacquart et Choisnel, 1995 ; Cantat *et al.*, 2011). Une hypothèse de décroissance exponentielle de la RU est émise avec :

$$[7]\ RU_i = RU_{i-1}.e^{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ET_i - PP_i)}{RU_t}}$$

Où RU_i est la réserve d'eau dans le sol à un instant i (mm), RU_t est la capacité maximale de la réserve utile (mm), *ET* est l'évapotranspiration à un instant *i* (mm) et *PP* sont les précipitations à un instant *i* (mm).

$$[8]\ PP.Q_i = \alpha.S_h + 1 - PP.Q_{i-1}$$

Où $PP.Q_i$ correspond aux précipitations efficaces à un instant *i* (mm), α est le coefficient d'écoulement direct fixé à 0,5 et *Sh* est le surplus hydrologique (mm).

$$[9]\ S_h = RU_t - RRU_i$$

Où RRU_i est la reconstitution de la réserve utile à un instant *i* (mm).

$$[10] RRU_i = RU_i + PP_i - ET_i - CHRU_i$$

Où $CHRU_i$ est le chargement de la réserve utile à un instant *i*.

$$[11]\ \ CHRU_i = RU_i - RU_{i-1}$$

Les variables retenues dans l'analyse de la réponse hydrologique à l'embouchure des rivières sont les PP, les PP.Q, les PP.Q cumulées sur une période de sept jours (fenêtre glissante), la RU, le CHRU, la RRU et le Sh. Les chroniques obtenues à partir de ces formules sont présentées dans la section suivante.

4.2.3. Données et variables intégrées aux modèles de régression

En conclusion, le modèle de régression linéaire multiple (RLM) est appliqué aux basses vallées de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle. Pour chaque basse vallée, un modèle RLM est élaboré à partir d'une variable dépendante, *i.e.* la lame d'eau des rivières, et de 13 variables explicatives. Ces variables explicatives sont :

- Les **variables hydrologiques** définies d'après les débits de base et l'état de la nappe ;
- Les **variables météorologiques** définies d'après les précipitations totales, les précipitations efficaces, le cumul des précipitations efficaces, la réserve utile, la reconstitution de la réserve utile, le chargement de la réserve utile et le surplus hydrologique ;
- Les **variables marines** définies d'après les hauteurs d'eau observées et prédites en mer, les surcotes ainsi que la durée de blocage potentiel des écoulements. Ces durées sont définies d'après un seuil de niveau de pleine mer et de vives-eaux.

Le pas de temps utilisé pour la modélisation est le pas de temps quotidien afin d'alléger le temps de traitement des modèles, de réduire les incertitudes liées au temps de réponse des lames d'eau à l'embouchure des vallées littorales par rapport aux différentes variables hydrologiques, météorologiques et surtout marines et d'intégrer des données harmonisées sur le même pas de temps.

4.3. Situations hydrodynamiques et lames d'eau excédentaires dans les embouchures

Comme présenté dans la section 4.2, la construction des modèles de régression linéaire multiple (RLM) repose sur l'intégration et l'harmonisation de données utilisées en tant que variables explicatives. Ces données doivent expliquer la décomposition du signal de la lame d'eau de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle. La deuxième composante fondamentale de ces modèles repose sur la détermination de situations hydrodynamiques. Le postulat est qu'à l'embouchure des rivières littorales, une interaction est constante et quotidienne entre la lame d'eau des rivières et les hauteurs d'eau en mer. L'intensité de cette interaction va alors être variable selon la situation hydrodynamique.

La section 4.3.1 présente les résultats des analyses statistiques multivariées et de compilation des bases de données utilisées pour la détermination des situations hydrodynamiques sur lesquels sont appliqués les modèles RLM.

La section 4.3.2 présente les résultats des modèles RLM pour chacune des embouchures. La réponse variable dépendante (la lame d'eau) est analysée grâce à 13 variables explicatives. À partir de ces modèles, les lames d'eau issues du blocage des écoulements par la mer (les lames d'eau excédentaires) sont déduites de la lame d'eau totale.

La section 4.3.3 propose une synthèse des résultats obtenus pour différents modèles et des lames d'eau excédentaires associées.

4.3.1. Détermination des situations hydrodynamiques intégrées au modèle RLM

Les mesures journalières des données hydrologiques s'étendent de : (1) 1984 à 2019 (35 ans) sur La Touques, (2) de 1995 à 2019 (24 ans) sur le Dun, (3) de 1984 à 2019 (35 ans) sur L'Yères et (4) de 1999 à 2019 (20 ans) sur La Bresle. Si le postulat de départ est que les hauteurs d'eau en mer ont un impact constant sur les rivières, il doit être nuancé afin de tenir compte de l'intensité potentielle des hauteurs d'eau en mer. Cette nuance est déterminée grâce à des situations hydrodynamiques (Sinha *et al.*, 2008 ; Mateo Lázaro *et al.*, 2016 ; Chen *et al.*, 2018). L'élaboration de ces situations doit servir à « contraindre » le modèle RLM. **Trois situations** sont considérées :

(1) **Situation hydrodynamique n°1** – toutes les dates sont considérées et intégrées aux modèles RLM (sans exclusion particulière) ;

(2) **Situation hydrodynamique n°2** – les dates expliquées à la fois par des variables hydrologiques et marines sont exclusivement considérées et intégrées aux modèles RLM ;

(3) **Situation hydrodynamique n°3** – les dates où une inondation continentale s'est produite sont exclusivement considérées et intégrées aux modèles RLM.

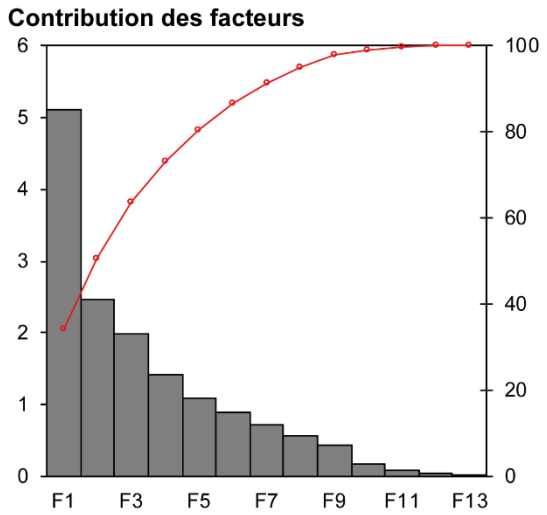
La situation hydrodynamique n°1 est déterminée d'après les différentes chroniques hydrologiques, marines et météorologiques et n'a donc pas fait l'objet de traitement particulier. La situation hydrodynamique n°2 est abordée dans la section 4.2.3.1 et est déterminée à partir d'une analyse par composante principale (ACP) appliquée sur les individus. La situation hydrodynamique n°3 est l'objet de la section 4.2.3.2 et est déterminée à partir d'un travail d'archives (universitaire, services de l'État, etc.).

4.3.1.1. Situation hydrodynamique n°2 : dates propices au blocage des écoulements par la mer

Les dates propices au blocage des écoulements par la mer (situation hydrodynamique n°2), sont déterminées à partir d'une analyse multifactorielle regroupant les variables sous forme de facteurs (Bertier et Bouroche, 1975 ; Chadule, 1994). Au total, 15 variables ont été collectées pour les quatre embouchures (La Touques, Le Dun, L'Yères et La Bresle) et synthétisées sous la forme d'une ACP (Analyse en composante principale) afin de faire ressortir les dates de blocage potentiel des écoulements par la mer avec des facteurs hydrologiques et marins dominants.

Sur La Touques, l'analyse factorielle est réalisée sur la base de 12 785 jours (appelé par la suite individus). Le premier axe factoriel (F1 – 34,10 %) regroupe l'ensemble des variables hydrologiques tel que *LE (la lame d'eau), Q (le débit)* et q_b (débit de base). Le deuxième axe factoriel (F2 – 16,45 %) comprend davantage l'ensemble des variables marines : Hem Obs (hauteur d'eau en mer observé), Hem P (hauteur d'eau en mer prédite), Blocage (durée de blocage potentielle des écoulements) (Figure 4.24).

Le positionnement des dates sur les plans factoriels F1 – F2 (50,55 % de la variance totale), oppose sur l'axe F1 le débit, la lame d'eau, les débits de bases ainsi que les précipitations (totales, efficaces et cumulées) au niveau piézométrique. Plus la valeur propre de F1 est importante, plus les lames d'eau en rivières, débits et débits de base sont élevées. De la même façon, plus les valeurs propres de F2 sont élevées, plus les conditions marines sont fortes. Au total, 1910 dates ont des valeurs propres F1 et F2 supérieures à zéro, traduisant de fortes conditions hydrologiques et marines, **soit 15 %** du total de l'échantillon.



Bassin de La Touques (situation hydrodynamique n°1)

	F1	F2	F3
Lame d'eau (m)	**0,621**	0,026	0,050
Q (m3/s)	**0,700**	0,021	0,065
Baseflow (m3/s)	**0,635**	0,032	0,098
PIEZ. 1 (m)	0,177	0,063	0,118
PP (mm)	0,253	0,083	**0,598**
PP.Q (mm)	**0,669**	0,008	0,088
PP.Q cum (mm)	**0,554**	0,005	0,009
RU (mm)	0,426	0,022	0,012
RRU (mm)	**0,509**	0,014	0,002
CHRU (mm)	0,016	0,059	**0,416**
Sh (mm)	**0,441**	0,024	0,229
Hem P (Z0 m)	0,003	**0,685**	0,146
Hem obs (Z0 m)	0,022	**0,811**	0,099
Surcote	0,065	0,130	0,009
Durée blocage (h)	0,026	**0,486**	0,049

Values in bold correspond for each variable to the factor for which the squared cosine is the largest

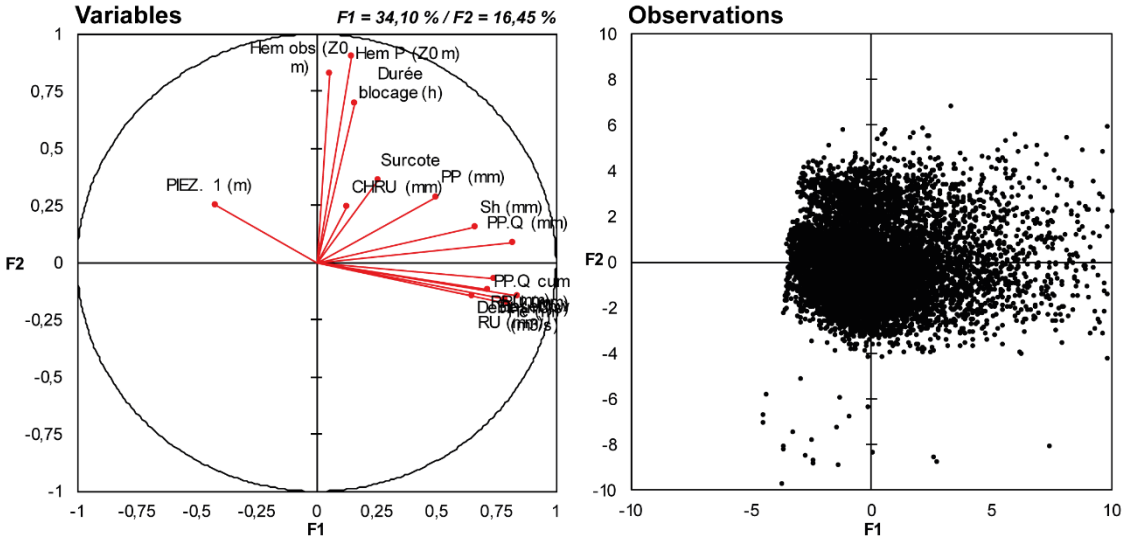
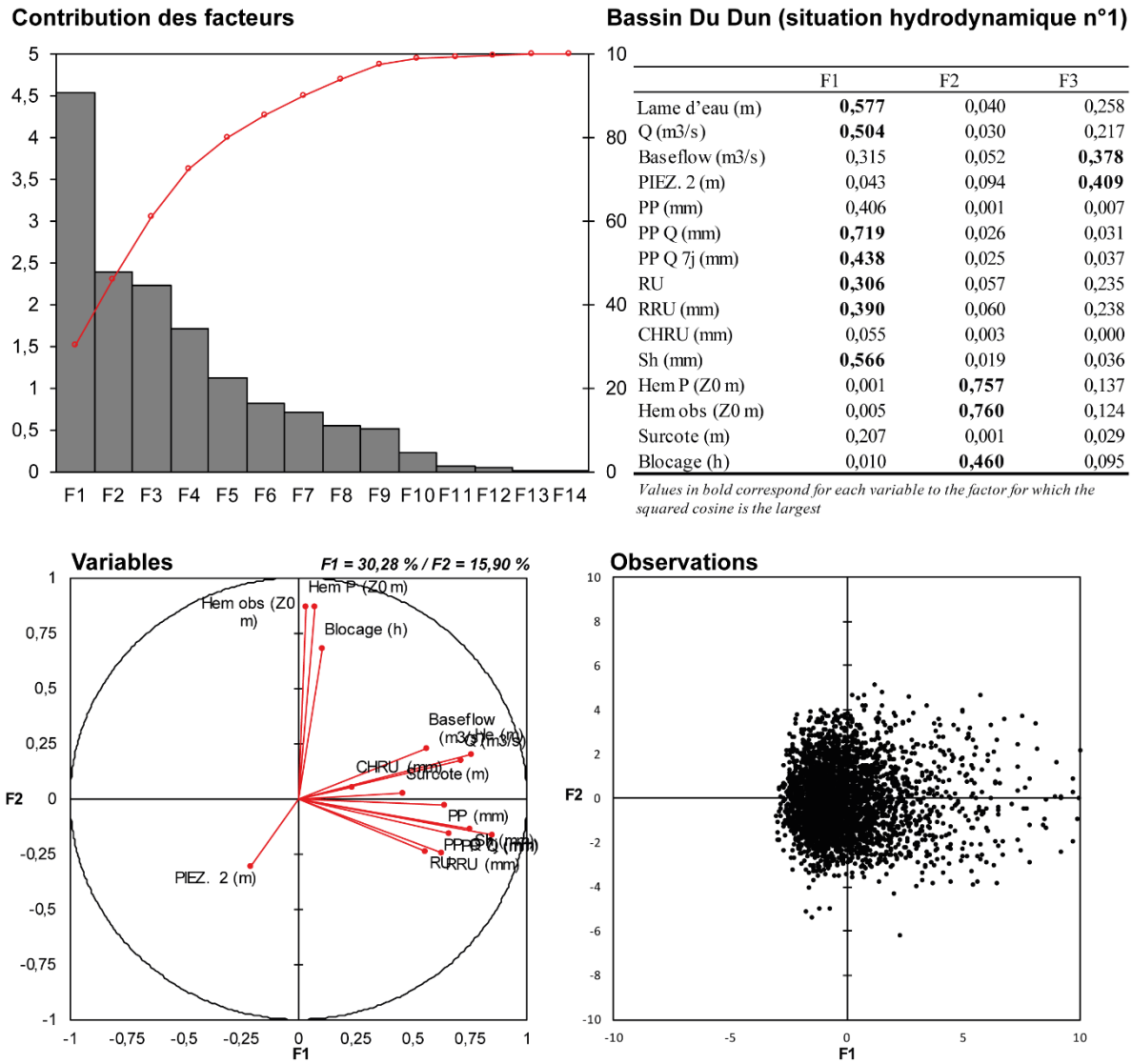


Figure 4.24 : Analyse par composante principale (ACP) appliquée sur l'embouchure de La Touques

Lame d'eau (m) : la lame d'eau maximum instantanée ; Q (m3/s) : débit maximum instantané ; Baseflow (m3/s) : débit de base ; PIEZ.X (m) : niveau piézométrique ; PP (mmm) : précipitations totales à la journée ; PP.Q (mm) : précipitations efficaces à la journée ; PP.Q cum 7j (mm) : cumul des précipitations efficaces sur une fenêtre glissante de sept jours ; RU (mm) : réserve utile ; RRU (mm) : reconstitution de la réserve utile ; CHRU (mm) : chargement de la réserve utile ; Sh (mm) : surplus hydrologique ; Hem P (Zo m) : hauteur d'eau prédite en mer (selon le zéro hydrographique) ; Hem Obs (Zo m) : hauteur d'eau observée en mer (selon le zéro hydrographique) ; Surcote : différence entre la hauteur observée et prédite en mer ; Blocage (h) : durée de blocage potentielle des écoulements pour un niveau de pleine mer et de vives-eaux.

Sur le Dun, l'analyse factorielle est réalisée sur la base de 8 756 individus. Le premier axe factoriel (F1 – 30,28 %) regroupe les données de débit, de lames d'eau, de précipitations (totales, efficaces et cumulées) ainsi que la réserve utile et les surplus hydrologiques. Le deuxième axe factoriel (F2 – 15,90 %) regroupe les variables marines Hem Obs, Hem P et durée de blocage (Figure 4.25). Le positionnement des dates sur les plans factoriels F1 – F2 (46,18 %) oppose le débit de base, les lames d'eau et la réserve utile au niveau piézométrique. En considérant des valeurs propres supérieures à zéro, pour F1 et F2, le nombre d'individus retenus s'élève à **568, soit 6,4 %** du total de l'échantillon.

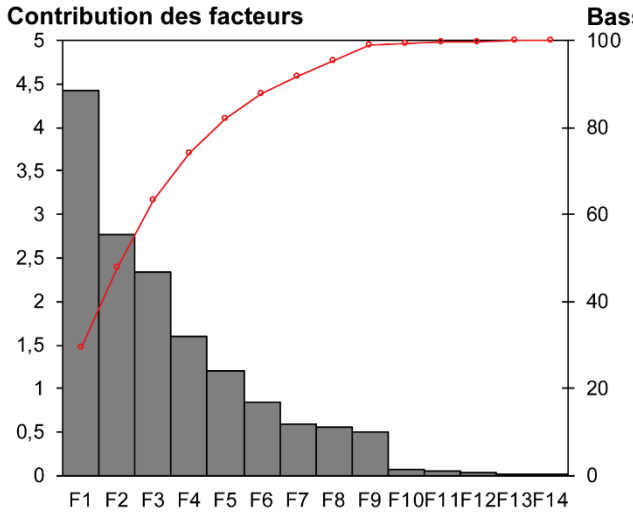


	F1	F2	F3
Lame d'eau (m)	**0,577**	0,040	0,258
Q (m3/s)	**0,504**	0,030	0,217
Baseflow (m3/s)	0,315	0,052	**0,378**
PIEZ. 2 (m)	0,043	0,094	**0,409**
PP (mm)	0,406	0,001	0,007
PP Q (mm)	**0,719**	0,026	0,031
PP Q 7j (mm)	**0,438**	0,025	0,037
RU	**0,306**	0,057	0,235
RRU (mm)	**0,390**	0,060	0,238
CHRU (mm)	0,055	0,003	0,000
Sh (mm)	**0,566**	0,019	0,036
Hem P (Z0 m)	0,001	**0,757**	0,137
Hem obs (Z0 m)	0,005	**0,760**	0,124
Surcote (m)	0,207	0,001	0,029
Blocage (h)	0,010	**0,460**	0,095

Values in bold correspond for each variable to the factor for which the squared cosine is the largest

Figure 4.25 : ACP appliquée sur l'embouchure Du Dun

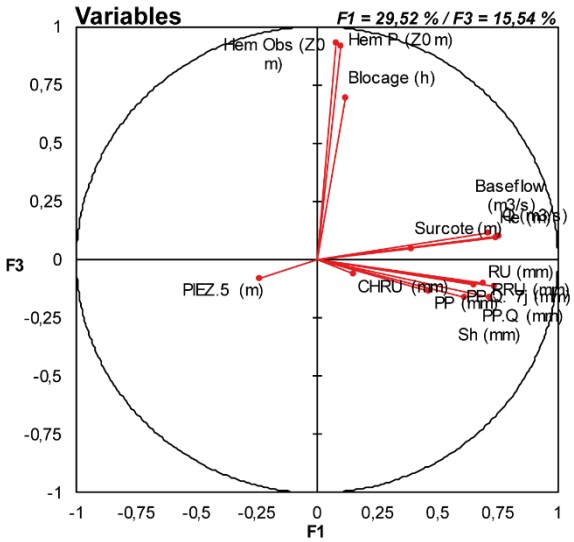
Sur L'Yères, l'analyse factorielle est réalisée sur la base de 12 780 individus. Le premier axe factoriel (F1 – 29,52 %) regroupe les données de lame d'eau, de débit, de débit de base, des précipitations efficaces et cumulées (PP.Q, PP.Q_{cum}) ainsi que de la réserve utile et du surplus hydrologique. Le troisième axe factoriel (F3 – 15 54 %), regroupe les variables marines telles que Hem Obs, Hem P et durée de blocage (Figure 4.26). Le positionnement des dates sur les plans factoriels F1 – F3 (45,06 %) oppose l'ensemble des variables hydrologiques et météorologiques avec les niveaux piézométriques. En considérant des valeurs propres supérieures à zéro, pour F1 et F3, le nombre d'individus retenus s'élève à **1 472 soit 11,5** % du total de l'échantillon.



Bassin de L'Yères (situation hydrodynamique n°1)

	F1	F2	F3
Lame d'eau (m)	**0,550**	0,381	0,009
Q (m3/s)	**0,571**	0,311	0,010
Baseflow (m3/s)	**0,505**	0,374	0,013
PIEZ.5 (m)	0,059	**0,362**	0,006
PP (mm)	0,216	**0,368**	0,018
PP.Q (mm)	**0,509**	0,213	0,026
PP.Q. 7j (mm)	**0,424**	0,037	0,011
RU (mm)	**0,478**	0,006	0,010
RRU (mm)	**0,538**	0,016	0,013
CHRU (mm)	0,023	0,178	0,004
Sh (mm)	**0,373**	0,264	0,026
Hem P (Z0 m)	0,006	0,033	**0,860**
Hem Obs (Z0 m)	0,010	0,049	**0,843**
Surcote (m)	0,153	0,125	0,002
Blocage (h)	0,014	0,047	**0,480**

Values in bold correspond for each variable to the factor for which the squared cosine is the largest



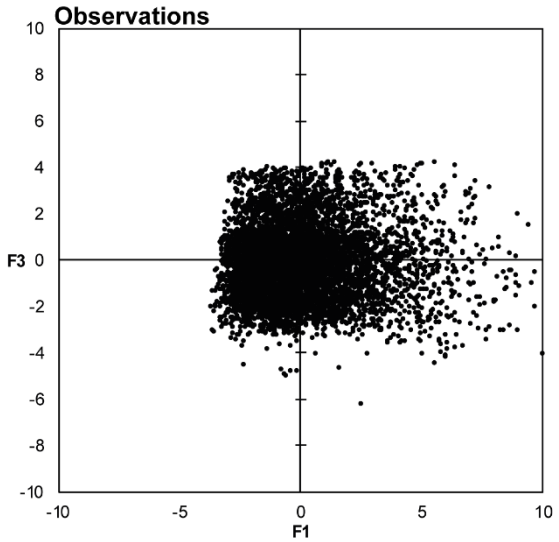
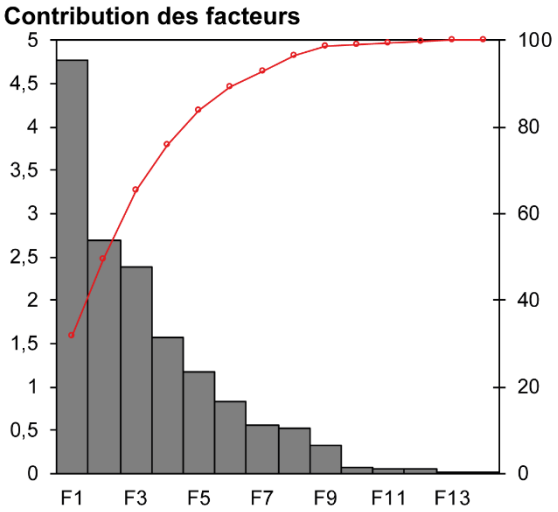


Figure 4.26 : ACP appliquée sur l'embouchure de L'Yères

Sur La Bresle, l'analyse factorielle est réalisée sur la base de 6 968 individus. Le premier axe factoriel (F1 – 31,73 %) regroupe les lames d'eau, le débit, débits de base, les niveaux piézométriques, les précipitations efficaces (total à la journée et cumulé) ainsi que la réserve utile. Le troisième axe factoriel (F3 – 15,86 %) regroupe les hauteurs de mer observées, prédites et durées de blocages (Figure 4.27). Le positionnement des dates sur le plan factoriel F1 – F3 (47,59 %) oppose les variables hydrologiques et météorologiques au niveau piézométrique. En considérant des valeurs propres supérieures à zéro pour F1 et F3, le nombre d'individus retenus s'élève à **699 soit 10 %** du total de l'échantillon.



Bassin de La Bresle (situation hydrodynamique n°1)

	F1	F2	F3
Lame d'eau (m)	**0,634**	0,268	0,000
Q (m3/s)	**0,665**	0,259	0,000
Baseflow (m3/s)	**0,599**	0,324	0,000
PIEZ.6 (m)	**0,396**	0,306	0,002
PP (mm)	0,167	**0,439**	0,005
PP.Q (mm)	**0,484**	0,272	0,004
PP.Q cum 7j (mm)	**0,422**	0,053	0,008
RU (mm)	**0,413**	0,047	0,007
RRU (mm)	**0,471**	0,078	0,007
CHRU (mm)	0,008	0,191	0,010
Sh (mm)	0,333	**0,350**	0,001
Hem P (Z0 m)	0,000	0,001	**0,889**
Hem Obs (Z0 m)	0,002	0,000	**0,888**
Surcote (m)	0,154	0,093	0,010
Blocage (h)	0,011	0,000	**0,548**

Values in bold correspond for each variable to the factor for which the squared cosine is the largest

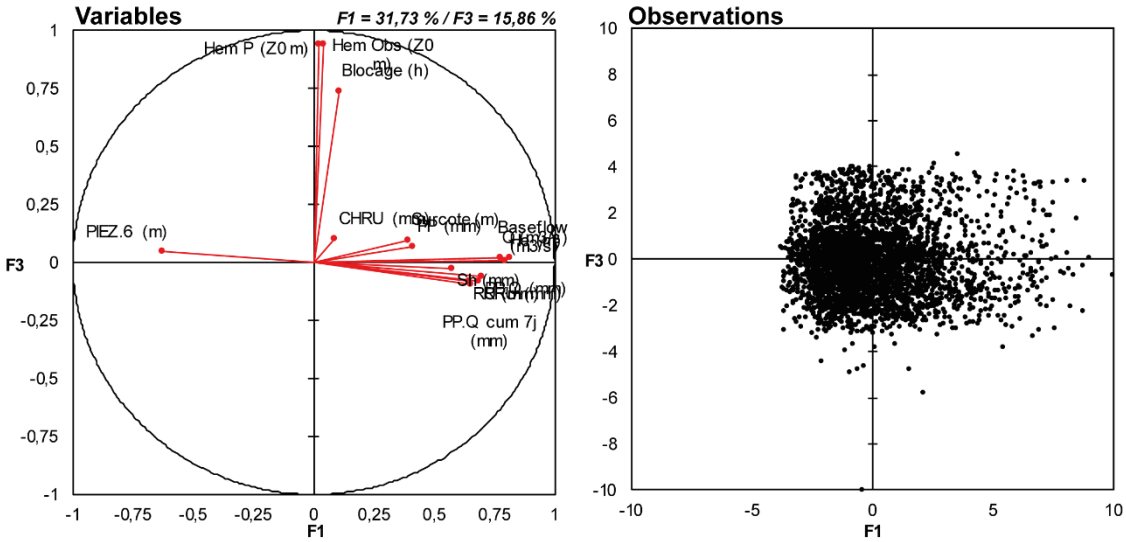


Figure 4.27 : ACP appliquée sur l'embouchure de La Bresle

Ainsi, l'embouchure de La Touques est potentiellement la plus touchée par des cas de concomitances avec un nombre d'individus potentiellement concernés par un effet de blocage des écoulements par la mer de 15 %. L'Yères compte 11,5 % et La Bresle 10 % d'individus potentiellement concernées par ces effets de blocage des écoulements par la mer. Finalement, le Dun semble être un des moins impactés avec seulement 6,4 % des individus potentiellement concernés par un effet de blocage.

4.3.1.2. Situation hydrodynamique n°3 : Inventaire des dates d'inondation par compilation de multiples bases de données

La situation hydrodynamique n°3 intégrée au modèle RLM, comprend les dates des inondations survenues à l'embouchure de La Touques, à l'embouchure du Dun, à l'embouchure de L'Yères et à l'embouchure de La Bresle. Ce sont soit des épisodes « extrêmes » ayant entraînés des dommages, des décès, soit des épisodes particulièrement morphogènes. La détermination de cette période d'analyse a nécessité un inventaire des événements survenus sur les sites d'études à travers l'utilisation de plusieurs bases de données ainsi qu'une harmonisation des inventaires réalisés par les différents acteurs (chercheurs, services de l'État, bureaux d'étude, réseaux d'observation, etc.).

a. Compilation et analyse des bases de données sur les événements hydrogravitaires

L'inventaire porte sur l'ensemble des événements historiques survenus sur les sites d'étude et comprend : [SM] submersion marine, [TEM] tempête, [INO] inondation par débordement de cours d'eau, [COU] coulée de boue, [MVT] mouvement de terrain, [CMV] choc mécanique lié à l'action des vagues, [EFF] effondrement de falaise, [EFT] effondrement de terrain. Mais par la suite, après une présentation factuelle des événements recensés, l'analyse cible les phénomènes d'inondation par débordement de cours d'eau en relation avec les submersions marines et les tempêtes.

Les arrêtés et dossiers CatNat[7] constituent une première source d'information sur les événements historiques survenus sur les sites d'étude en fournissant une information précise sur les dates de début et de fin d'un événement ainsi que sur le type d'événement. La nomenclature utilisée dans les arrêtés est à vérifier et à corréler à d'autres bases de données, car pour exemple le terme de « coulée boueuse » ne désigne pas un mouvement de masse déclenché par gravité, comme c'est le cas en géomorphologie (George, 1960 ; Pierson et Costa, 1987 ; Auzet et Malet, 2005), mais fait référence à un phénomène hydrologique de crue turbide (Douvinet, 2006, 2008).

Sur le **site d'étude n°1** (Houlgate à Honfleur), les événements les plus marquants sont liés à la submersion marine de novembre 1984, à la tempête du 15 octobre 1987, à la submersion marine du 26 février 1990 concomitante avec des inondations et coulées, aux inondations et coulées de boue de 1995 et 2000, aux glissements de terrain de 2001 et surtout aux importantes inondations et coulées boueuses survenues en juin 2003 (Tableau 4.5). Au regard des 24 arrêtés CatNat, le site n°1 est affecté à 46 % par des inondations et coulée de boue (11 arrêtés), à 38 % par des mouvements de terrain (9 arrêtés) et à 17 % par des submersions marines et des tempêtes (4 arrêtés) (Tableau 4.6).

Sur le **site d'étude n°2** (Quiberville à Dieppe) un total de 32 arrêtés CatNat ont été identifiés (Tableau 4.6). Les événements les plus marquants sont liés à la série de tempête concomitante à des inondations survenues en février 1990, aux inondations et coulées de boue du 20 décembre 1993, aux inondations et coulées de boue du 17 janvier 1995, aux inondations du 24 décembre 1999 ainsi qu'aux inondations du 6 et 7 mai 2000 (Tableau 4.5). Environ 73 % des arrêtés sont liés à des inondations et à des « coulées boueuses », 12 % sont liés à des concomitances entre inondations et submersions marines, 12 % sont liés à des mouvements gravitaires (effondrement de falaises, mouvement de terrain et effondrement de terrain) et seulement 3 % sont liés à des submersions marines simples.

[7] *Téléchargement en libre accès sur : http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/telechargement/gaspar*

Tableau 4.5. Inventaire des arrêtés CatNat entre 1984 et 2019 et nombre de communes touchées sur les sites d'étude n°1 (*S1*), n°2 (*S2*) et n°3 (*S3*).

Date	*Événement*	*S1*	*S2*	*S3*	*Date*	*Événement*	*S1*	*S2*	*S3*
22/11/1984	[SM]		5		**05/08/1997**	[INO] & [COU]		2	1
22/11/1984	[CMV]			2	**16/12/1998**	[MVT]	**1**		
23/11/1984	[SM]	**6**			**24/12/1999**	[INO] & [COU]		6	1
22/08/1987	[INO] & [COU]			5	**08/01/2000**	[MVT]		1	
15/10/1987	[TEM]	**20**			**05/05/2000**	[INO] & [COU]	**1**		
23/11/1987	[INO] & [COU]			1	**06/05/2000**	[INO] & [COU]		9	
15/01/1988	[INO] & [COU]	**3**			**07/05/2000**	[INO] & [COU]		17	
22/01/1988	[INO] & [COU]		3	2	**07/11/2000**	[INO] & [COU]	**4**		
09/02/1988	[INO] & [COU]			1	**10/11/2000**	[MVT]		1	
12/02/1988	[MVT]	**1**			**12/11/2000**	[INO] & [COU]	**1**		
05/12/1988	[INO] & [COU]	**1**			**17/03/2001**	[MVT]	**3**		
01/04/1989	[MVT]	**2**			**29/03/2001**	[INO] & [COU]			1
12/09/1989	[INO] & [COU]		1		**04/04/2001**	[MVT]	**1**		
11/02/1990	[INO] & [SM]		4		**29/04/2001**	[MVT]			1
11/02/1990	[INO] & [CMV]			2	**07/07/2001**	[INO] & [COU]			7
26/02/1990	[INO] & [COU]& [SM]	**7**			**04/01/2003**	[MVT]	**1**		
26/02/1990	[INO] & [SM]		4		**31/05/2003**	[INO] & [COU]	**1**		
26/02/1990	[INO] & [CMV]			4	**01/06/2003**	[INO] & [COU]	**14**		
01/01/1991	[MVT]	**1**			**01/06/2003**	[MVT]	**2**		
02/12/1992	[INO] & [COU]		1		**28/06/2005**	[INO] & [COU]		5	
10/01/1993	[INO] & [COU]	**1**			**16/07/2007**	[INO] & [COU]			1
09/06/1993	[INO] & [COU]		4		**28/09/2007**	[INO] & [COU]	**3**		
20/09/1993	[INO] & [COU]		1		**10/03/2008**	[INO] & [SM]		2	
11/10/1993	[INO] & [COU]		2		**18/05/2008**	[INO] & [COU]		1	
12/10/1993	[INO] & [COU]	**1**			**28/05/2008**	[INO] & [COU]			2
20/12/1993	[INO] & [COU]		13	1	**26/05/2010**	[INO] & [COU]		1	
16/05/1994	[INO] & [COU]		1	1	**18/09/2011**	[INO] & [COU]		2	
27/07/1994	[INO] & [COU]			4	**23/09/2012**	[INO] & [COU]		1	
30/07/1994	[INO] & [COU]		1		**19/04/2014**	[INO] & [COU]		1	
17/01/1995	[INO] & [COU]	**4**	16	2	**21/05/2014**	[INO] & [COU]		5	
26/01/1995	[EFF]		1		**13/08/2015**	[INO] & [COU]		1	
12/02/1995	[EFT]		1		**12/01/2017**	[INO] & [SM]		1	
12/02/1995	[INO] & [COU]			1	**12/01/2017**	[INO] & [CMV]			1
01/01/1996	[MVT]	**1**			**03/01/2018**	[INO] & [SM]	**2**		
11/06/1997	[INO] & [COU]			2	**30/04/2018**	[INO] & [COU]		3	
17/07/1997	[INO] & [COU]			2					

[SM] Submersion marine, [TEM] tempête, [INO] inondation par débordement de cours d'eau, [COU] coulée de boue, [MVT] mouvement de terrain, [CMV] choc mécanique lié à l'action des vagues, [EFF] effondrement de falaise, [EFT] effondrement de terrain. L'utilisation du sigle « & » marque la présence de deux événements ou plus à une même date (concomitance).

Sur le **site d'étude n°3** (Criel-sur-Mer à Ault), 22 arrêtés CatNat ont été identifiés (Tableau 4.5 et Tableau 4.6). Les événements les plus importants sont liés aux inondations et coulées de boue du 22 août 1987, aux concomitances entre tempêtes, submersions marines et débordements de cours d'eau du 26 février 1990, aux inondations et coulées de boue du 27 juillet 1994 et aux inondations et coulées de boue du 7 juillet 2001. Sur les 22 arrêtés CatNat identifiés, 77 % sont des inondations et coulées boueuses (17 arrêtés), 14 % sont des concomitances entre des inondations et des submersions marines (chocs mécaniques liés à l'action des vagues) (trois arrêtés), 5 % concernent des submersions simples (un arrêté) et 5 % des mouvements de terrain simples (un arrêté).

Tableau 4.6. Synthèse des arrêtés CatNat survenus entre 1984 et 2019 sur les trois sites d'étude

Événement	Site d'étude n°1	Site d'étude n°2	Site d'étude n°3
[CMV]			1
[EFF]		1	
[EFT]		1	
[INO] & [CMV]			3
[INO] & [COU]	11	23	17
[INO] & [COU]& [SM]	1		
[INO] & [SM]	1	4	
[MVT]	9	2	1
[SM]	1	1	
[TEM]	1		
Total	**24**	**32**	**22**

[SM] Submersion marine, [TEM] tempête, [INO] inondation par débordement de cours d'eau, [COU] coulée de boue, [MVT] mouvement de terrain, [CMV] choc mécanique lié à l'action des vagues, [EFF] effondrement de falaise, [EFT] effondrement de terrain. L'utilisation du sigle « & » marque la présence de deux événements ou plus à une même date (concomitance).

Si les références CatNat recensent les événements les plus destructeurs, ils ne peuvent être suffisants pour identifier les autres événements moins morphogènes survenus sur les sites. Afin de compléter l'inventaire, des sources d'information supplémentaires ont été utilisées. Ces informations proviennent des bases de données issues de travaux de recherches académiques (Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2012 ; Letortu, 2013), des fiches tempêtes de Météo France, des dossiers du SHOM, des plans de prévention des risques inondation (PPRi) et plans de prévention des risques littoraux (PPRl), ainsi que des données issues de stations hydrologiques.

Cet inventaire est soit réalisé dans le cadre du projet PPR, soit issu de l'évaluation préliminaire des risques (EPRI) mise en place pour la directive-cadre « inondation » par la direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (DRIEE) d'Île-de-France. Les dates d'inventaire sont déterminées entre 1984 et 2019 afin de les faire correspondre aux arrêtés CatNat et aux chroniques de débit et de lames d'eau dans les embouchures.

Pour le PPR de la basse vallée de **La Touques**, **huit débordements de cours d'eau** ont été identifiés. Parmi ces huit dates, quatre n'étaient pas initialement recensées : les inondations de décembre 1993, de novembre 1994, de novembre 2000 et de décembre 2002 (Tableau 4.7).

La description des inondations permet d'identifier **trois événements concomitants** :

- En **décembre 1988,** des inondations liées à des débordements de cours d'eau sont concomitantes à des crues turbides dans les vallons secs et drainés dans la basse vallée de La Touques (concomitance de type [B1] cf. Figure 4.1) ;

- Le **13 août 1997,** des débordements de cours d'eau sont survenus en même temps que des orages estivaux engendrant des crues turbides (concomitance de type [B2] cf. Figure 4.1) ;
- Le **1er mars 2001,** des débordements de cours d'eau sont survenus en même temps que des remontées de nappes dans la basse vallée de La Touques (concomitance de type [B3] cf. Figure 4.1).

À partir du PPRi, **trois débordements de cours d'eau** ont été identifiés sur **le Dun**, **12 sur la Saâne** et **17 sur L'Arques**. L'événement le plus important enregistré sur le Dun est l'inondation de 29 janvier 1995 avec une période de retour de 30 à 40 ans (Tableau 4.7).

Tableau 4.7. Inondations liées à des débordements de cours d'eau d'après les inventaires issus des plans de prévention des risques inondation (PPRi)

Date	*Description de l'évènement*	*La Touques*	*Le Dun*	*La Saâne*	*L'Arques*
22/01/1988	Non renseigné				O
XX/03/1988	Non renseigné			O	O
XX/12/1988	Peu d'informations : les dégâts sont liés à des inondations et coulées de boues	O		O	O
12/09/1989	Non renseigné				O
22/02/1990	Non renseigné			O	O
XX/02/1990	Crue de la Calonne (PR = 10 ans)	O			
07/12/1992	Non renseigné			O	O
09/06/1993	Non renseigné				O
20/09/1993	Non renseigné				O
20/12/1993	Inondation la plus dévastatrice pour plusieurs communes			O	O
XX/03/1993	Non renseigné			O	O
XX/10/1993	Non renseigné			O	O
XX/12/1993	Crue moyenne	O			
XX/11/1994	Inondation de la Touques influencée par la Calonne. La ville de Pont-l'Évêque est inondée	O			
XX/12/1994	Non renseigné			O	O
17/01/1995	Non renseigné				O
29/01/1995	Crue d'ampleur à 1993, liée à une remontée de nappe et à de fortes précipitations		O	O	O
XX/01/1995	Inondation durant 8 heures allant jusqu'à Trouville-sur-Mer	O			
01/11/1998	Non renseigné			O	O
25/12/1999	Crue la plus forte sur la vallée de l'Arques (crue de référence)			O	O
06/05/2000	Crue concomitante à d'importantes précipitations, à de forts coefficients de marée, à des remontées de nappes		O	O	O
01/11/2000	Crue quasi centennale sur la Calonne. Inondation de la Touques à Pont-l'Évêque	O			
01/03/2001	Inondation concomitante avec une remontée de nappe (Pont-l'Évêque touché)	O			
21/03/2001	Crue avec un débit de 6.49 m^3/s sur le Dun		O		
XX/12/2002	Crue de la Calonne et de la Touques	O			

XX signifie que le jour n'a pas été indiqué dans l'inventaire du PPRi. Le PPRi de la Touques a été mis à jour en 2016, le PPRi du Dun a été prescrit en 2011, PPRi de la Saâne a été prescrit en 2001, le PPRi de L'Arques a été prescrit en 2011.

La Saâne, L'Arques, L'Yères et La Bresle ont des comportements similaires et l'événement majeur enregistré sur L'Arques (crue de référence) est daté du 25 décembre 1999. Trois événements concomitants ont ainsi été identifiés :

- En **décembre 1988**, des débordements de cours d'eau sont survenus en même temps que des crues turbides (situation similaire à la basse vallée de La Touques pour la même période avec une concomitance de type [B2] *cf.* Figure 4.1) ;
- Le **29 janvier 1995,** un débordement de cours d'eau avec une période de retour estimée entre 30 et 40 ans est lié à des remontées de nappes ainsi qu'à d'importantes précipitations entraînant du ruissellement dans les zones urbaines (concomitance de type [B2] et [B3] *cf.* Figure 4.1) ;
- Le **6 mai 2000**, un débordement de cours d'eau est lié à d'importantes précipitations, à de forts coefficients de marée ainsi qu'à des remontées de nappes (concomitance de type [B1], [B2] et [B3] *cf.* Figure 4.1).

L'inventaire réalisé par la DRIEE (2018) est complémentaire aux bases de données CatNat et PPR en précisant les dates où l'information est manquante. Pour exemple, le débordement non daté précisément le XX/12/1988 sur la basse vallée de La Touques correspond au débordement du 5/12/1988 avec une période de retour (*P.R.*) supérieure à cinquante ans (0).

Tableau 4.8. Inventaire des inondations (débordement, submersion, ruissellement, etc.) issu de la DRIEE Île-de-France (2018)*

Date	*La Touques*	*L'Arques*	*L'Yères*	*La Bresle*	*Événement*	*PR*
22/09/1984				O	[SM]	
19/10/1986				O	[SM]	
14/02/1990	O				[INO]	> 5 ans
14/02/1990			O		[SM]	
21/12/1991				O	[SM]	
11/11/1992				O	[SM]	
11/01/1993	O				[INO]	5 ans
14/11/1993				O	[SM]	
27/07/1994				O	[SM]	
28/02/1995				O	[RDN] & [INO]	
19/02/1996			O		[SM]	
28/10/1996				O	[SM]	
20/12/1999	O				[INO]	10 ans
06/11/2000	O				[INO]	5 à 10 ans
05/01/2001	O				[INO]	< 15 ans
25/03/2001	O				[RDN] & [INO]	15 à 20 ans
10/04/2001				O	[INO]	
28/02/2002				O	[INO] & [RUI]	
03/01/2018	O				[TEM] & [INO]	

*Les informations redondantes et/ou n'apportant pas d'information complémentaire sur les événements survenus au regard des inventaires issus des arrêtés CatNat et des PPRI ont été supprimées de la liste.

Sur les 32 événements initialement identifiés dans les bases de données de la DRIEE, 19 événements (59 %) apportent de nouvelles dates à la liste des événements initialement non répertoriés dans les arrêtés CatNat ou dans les PPR, ou apportent des informations complémentaires sur les types d'événements survenus à une date donnée.

À partir de la description des événements de l'inventaire de la DRIEE (2018), de nouvelles dates comprenant des concomitances ont été identifiées :

- Le **27 juillet 1994**, des submersions marines se sont produites en même temps que des débordements de cours d'eau et des coulées de boue sur la basse vallée de La Bresle (concomitance de type [B1] et [B2] cf. Figure 4.1) ;
- Le **25 mars 2001**, des débordements de cours d'eau se sont produits en même temps que des remontées de nappes sur la basse vallée de La Touques (concomitance de type [B3] cf. Figure 4.1) ;

Les données des chroniques présentées dans la section 4.2 ont été utilisées pour quantifier les variables associées aux débordements de cours d'eau. La synthèse de ces événements est présentée dans la suite de cette section.

b. Synthèse des inondations historiques sur les sites d'étude

La synthèse des inondations (*i.e.* situation hydrodynamique n°3) comprend une variable dépendante, la lame d'eau (variable A – Tableau 4.9) et 13 variables explicatives allant du débit de base à la durée de blocage des écoulements (variables B à N).

Tableau 4.9. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure de La Touques (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées)

Date	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
25/01/1984	***1,68***	22,2	1,4	3,6	2,9	30,5	100	103	***0***	***2,6***	7,36	7,36	0	0
07/04/1985	***1,14***	22,3	1,5	5,9	4,6	10,2	100	104	***0***	***4,2***	8,69	8,69	0	4
31/03/1986	***1,78***	18,2	1,4	1,2	5	48,3	100	100	***-0,2***	***0***	8	8	0	0
02/01/1987	***1,78***	22	1,7	6,5	8,4	33,9	100	106	0	5,6	8,42	8,25	-0,17	3
10/01/1991	***1,12***	13,8	4	5,6	7	42,6	100	105	0	4,7	6,6	6,86	0,26	0
11/01/1993	***3,16***	7,9	1,6	28,8	19,8	32,2	100	128	0	27,6	8,23	8,72	0,49	4
25/01/1994	***1,95***	14,8	1,1	2,2	5	29,3	100	101	0	0,8	7,29	7,4	0,11	0
26/01/1995	***3,22***	31,9	1,3	9,6	11,7	64,8	100	109	0	8,9	6,92	7,21	0,29	0
05/01/1998	***1,36***	17,7	1,4	10,8	8,6	39,7	100	109	0	9,2	7,43	8,2	0,77	1
20/02/1999	***1,89***	17,4	1,3	2,4	7,1	28,1	100	102	0	1,6	8,04	8,11	0,07	2
28/02/1999	***0,77***	12,6	1,3	5,8	2,6	15,4	100	104	0	4,3	7,61	7,54	-0,07	0
07/11/2000	***3,39***	26,8	1,3	43	29,8	73	100	142	0	42,4	6,75	7,07	0,32	0
19/03/2002	***0,87***	13	1,6	19,2	8,7	10,2	100	117	0,9	16,9	7,59	8,03	0,44	1
02/01/2003	***2,93***	34,4	1,4	2,8	7,6	36,5	100	102	0	1,6	7,88	8,4	0,52	3
13/01/2004	***1,53***	19,1	3,9	3,6	5,5	24,5	100	103	0	2,6	7,35	7,64	0,29	0
23/01/2005	***1,94***	12,6	1,4	0,6	7,6	36,5	100	100	-0,3	0	7,2	7,05	-0,15	0
08/03/2006	***1,43***	13,5	1,4	8	8,9	24,8	100	107	0	7,3	6,33	6,31	-0,02	0
14/02/2007	***1,54***	15	1,1	20,8	13,2	35,4	100	120	0	19,8	6,71	6,77	0,06	0
10/12/2007	***2,45***	27,2	0,9	0,8	3,9	36	100	100	-0,5	0	7,6	7,51	-0,09	0
05/12/2008	***1,19***	15,2	1,4	13,8	10,3	34,4	100	113	0	12,9	6,82	7,18	0,36	0
10/02/2016	1,84	18,2	0,4	7,8	8,7	35,9	100	107	0	6,9	8,27	8,583	0,313	3
03/01/2018	1	22	0,6	6,8	6,2	46,9	100	105	***0***	***4,9***	8,34	9,107	0,767	4
04/01/2018	2,314	22	0,43	10,3	8	52,8	100	110	0	9,7	8,34	8,76	0,42	4
22/01/2018	2,47	29,5	0,4	15	15,5	54,1	100	114	0	14	7,45	7,45	0	0

A : lame d'eau (m) ; B : débit de base ($m^3.s^{-1}$) ; C : niveau de nappe (m) ; D : précipitations totales (mm) ; E : précipitations efficaces (mm) ; F : cumul de précipitations efficaces sur sept jours (mm) ; G : réserve utile (mm) ; H : reconstitution de la réserve utile (mm) ; I : chargement de la réserve utile (mm) ; J : surplus hydrologique (mm) ; K : hauteur d'eau en mer prédite (m ZH) ; L : hauteur d'eau en mer observée (m ZH) ; M : surcote (m) ; N : durée de blocage des écoulements (h).

Les valeurs indiquées en couleur rouge dans le tableau sont issues d'une extrapolation des données. Dans le cas où aucune donnée de hauteur d'eau en mer observée n'est disponible (variable L), la valeur de hauteur d'eau prédite (variable K) a été appliquée. Les calculs de la durée de blocage sont alors effectués à partir des données prédites par le SHOM.

À l'embouchure de **La Touques**, 24 débordements de cours d'eau ont été recensés avec des lames d'eau variant entre 3,39 m (le 7 novembre 2000) et 0,77 m (le 28 février 1999) (Tableau 4.9). Avec une moyenne de lame d'eau de 1,86 m et un écart-type σ = 0,74, l'embouchure de La Touques subit les plus grandes variations de lames d'eau comparées aux embouchures du Dun, de L'Yères et de La Bresle. Les **plus fortes hauteurs d'eau en mer observées et concomitantes aux débordements de cours d'eau** se sont produites **les 3 et 4 janvier 2018 avec 9,1 m ZH.**

À l'embouchure **du Dun**, 21 débordements de cours d'eau ont été recensés avec des lames d'eau variant entre 1,04 m (le 26 décembre 1999) et 0,23 m (le 19 juillet 2017) (Tableau 4.10). La valeur moyenne de la lame d'eau est de 0,57 m et l'écart type σ = 0,21. Les **plus fortes hauteurs d'eau en mer observées et concomitantes aux débordements de cours d'eau** se sont produites **le 26 décembre 1999 avec 9,5 m ZH ainsi que le 10 février 2016 avec 10 m ZH.**

Tableau 4.10. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure du Dun (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées)

Date	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
16/05/1996	0,33	0,22	3	5,6	0,1	0,7	65	65	5,1	0	8,9	***8,9***	***0***	***0***
29/11/1996	0,29	0,09	4,9	17	9,8	25	100	117	0	17	8,8	***8,8***	***0***	***0***
02/09/1998	0,43	0,47	7,2	55	0,1	0,7	74	74	54,4	0	7,3	***7,3***	***0***	***0***
26/12/1999	1,04	3,36	6,1	0	6,7	32,1	99	99	-1,4	0	9,5	***9,5***	***0***	***3***
21/03/2001	0,87	3,24	1,6	8,4	12,1	57,1	100	106	0	5,8	8,3	8,3	***0***	0
04/01/2003	0,89	0,75	2,8	2,4	5,3	41,3	100	102	0	2,2	9	9,2	***0,2***	0
01/02/2004	0,34	0,24	4	1,8	0,6	8,4	100	100	-0,1	0	6,8	***6,8***	***0***	***0***
28/07/2005	0,26	0,11	6,4	0,2	0,1	0,7	72	72	-3,4	0	7,7	7,7	***0***	0
06/12/2005	0,25	0,11	7,2	9	9,7	25	100	108	0	8,2	8,2	8,4	***0,2***	0
23/10/2006	0,75	0,11	8,5	19,8	0,1	0,7	82	82	19	0	8,9	9,2	***0,3***	0
18/05/2008	0,77	0,29	4,3	9	0,1	0,7	64	64	7,2	0	8,5	***8,5***	***0***	***0***
03/12/2008	0,52	1,9	4,3	0	6,8	22,1	99	99	-0,6	0	8,1	***8,1***	***0***	***0***
27/08/2010	0,52	0,2	5,3	4,4	0,1	0,7	45	45	3,1	0	8,9	8,9	***0,1***	0
13/11/2010	0,66	0,25	5,7	46,1	26,5	66,9	100	146	0	46	7,1	7,5	***0,4***	0
21/06/2012	0,72	0,11	7,4	13,1	0,1	0,7	73	73	9,5	0	8,8	8,8	***0***	0
22/12/2012	0,71	0,23	5,8	26,6	14,5	31,2	100	126	0	26,4	7,3	7,5	***0,2***	0
24/12/2013	0,63	0,36	4	22,6	12	15,8	100	122	0	21,7	7,7	8,1	***0,4***	0
13/08/2015	0,51	0,31	4,2	13,4	0,1	0,7	69	69	11,1	0	8,9	9,1	***0,2***	0
10/02/2016	0,64	1,52	4,5	6,9	10	35,2	100	106	0	6	9,7	10	***0,4***	2
19/07/2017	0,23	0,09	7,1	12,3	0,1	0,7	26	26	8	0	8,4	8,5	***0,1***	0
30/04/2018	0,76	0,23	4	30,3	7,2	7,8	100	114	15,7	14,2	9,1	9,4	***0,3***	1

A : lame d'eau (m) ; B : débit de base ($m^3.s^{-1}$) ; C : niveau de nappe (m) ; D : précipitations totales (mm) ; E : précipitations efficaces (mm) ; F : cumul de précipitations efficaces sur sept jours (mm) ; G : réserve utile (mm) ; H : reconstitution de la réserve utile (mm) ; I : chargement de la réserve utile (mm) ; J : surplus hydrologique (mm) ; K : hauteur d'eau en mer prédite (m ZH) ; L : hauteur d'eau en mer observée (m ZH) ; M : surcote (m) ; N : durée de blocage des écoulements (h).

À l'embouchure de **L'Yères**, 35 débordements de cours d'eau ont été recensés avec des lames d'eau variant de 0,29 m (le 12 juin 1997) à 1,09 m (le 26 décembre 1999) (Tableau 4.11). La valeur moyenne de la lame d'eau est de 0,75 m et l'écart type σ = 0,16. Les **plus fortes hauteurs d'eau**

en mer observées et concomitantes aux débordements de cours d'eau se sont produites **le 1 mars 2014 avec 9,9 m ZH ainsi que le 26 décembre 1999 avec 9,7 m ZH.**

Tableau 4.11. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure de L'Yères (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées)

Date	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
31/01/1984	0,8	3,5	***54,3***	14	9,1	24,2	100	113	0	13	8,6	8,8	0,2	0
15/05/1985	0,7	3,6	***53,3***	0	2,2	7,1	98	98	-1,9	0	8,2	8,2	0	0
31/03/1986	0,8	3,3	***54***	1,2	5,5	30,4	100	100	-0,2	0	9,2	***9,2***	0	***0***
24/03/1987	0,8	3,5	***53,3***	4,9	3,1	6,4	100	103	0	3,3	7,2	***7,2***	0	***0***
11/02/1988	0,9	8,3	***53***	3,2	4,9	44	100	102	0	2	7,3	7,5	0,2	0
08/03/1989	0,8	3,7	***53,7***	0	3,9	22,9	99	99	-1,4	0	9,9	9,9	0,1	1
15/02/1990	0,8	3,2	***54,7***	2	9,3	45,6	100	101	0	1,3	8,8	***8,8***	0	***0***
12/01/1991	0,8	3,5	***53,6***	6,6	3,8	24	100	106	0	6,2	7,5	***7,5***	0	***0***
20/08/1992	0,5	1,5	***54,2***	7,5	0,1	0,7	80	80	5,2	0	8,3	***8,3***	0	***0***
07/12/1992	0,9	6,1	***54,5***	5,5	8,5	58,7	100	104	0	4,3	8,3	***8,3***	0	***0***
20/12/1993	1	5,1	***53,8***	28	19,2	63,8	100	127	0	27	8,1	***8,1***	0	***0***
17/02/1995	1	8,7	***53,8***	25	15,9	42,6	100	123	0	23	9,6	***9,6***	0	***1***
08/09/1995	0,6	2,1	***53,4***	1,2	0,1	0,7	36	36	-0,8	0	9,4	***9,4***	0	***1***
12/06/1997	0,3	2,1	***54,4***	1,6	0,1	0,7	54	54	-0,9	0	7,8	***7,8***	0	***0***
19/12/1997	0,4	3	***54,9***	9	9,9	22,9	100	109	0	8,8	8,7	***8,7***	0	***0***
01/11/1998	0,8	3,6	***54,2***	0	6,7	32,1	99	99	-1,4	0	8,8	***8,8***	0	***0***
26/12/1999	1,1	8	***53,6***	13	16,4	57,6	100	112	0	12	9,7	***9,7***	0	***1***
28/01/2001	0,8	6,3	52,6	0	1	35,9	99	99	-0,6	0	8,6	8,9	0,3	0
20/03/2002	0,9	7,7	55	2,4	2,6	7,6	100	101	0	0,7	7,9	7,9	0	0
03/02/2003	0,8	6	55,5	3,6	3,1	11,2	100	103	0	2,7	9	***9,3***	0,3	***0***
01/02/2004	0,6	2,8	56,4	1,8	0,6	8,4	100	100	-0,1	0	7,1	***6,9***	-0	***0***
04/07/2005	0,7	2	56	2,4	0,1	0,7	79	79	-1,4	0	8,2	8,5	0,3	0
20/02/2006	0,6	2,9	56,5	4	7	29	100	103	0	3,3	7,8	7,6	-0	0
16/07/2007	0,8	2,4	56,3	27	7,4	8	100	115	9,4	15	8,9	9,1	0,2	0
28/05/2008	0,8	4,5	54,3	0	1,5	5	97	97	-3	0	7,4	***7,4***	0	***0***
05/12/2008	0,7	3,9	55,9	20	14,7	46,9	100	119	0	19	7,6	***7,6***	0	***0***
28/11/2010	0,5	1,8	57	0,2	0,1	0,7	98	98	0	0	7,9	8	0,1	0
13/11/2010	0,7	2	57	46	26,5	66,9	100	146	0	46	7,1	7,5	0,4	0
16/12/2011	0,7	3,5	57,4	2,2	7,3	44,2	100	102	0	1,7	8,2	8,5	0,3	0
25/08/2013	0,8	2,2	56,6	3	1,4	2,9	100	102	0	1,8	8,9	9	0,1	1
01/03/2014	0,8	6,3	55,1	0	2,8	14,3	99	99	-1,3	0	9,7	9,9	0,2	2
01/02/2015	0,8	5,5	56,6	1,6	2,5	19,5	100	101	0	0,5	8,5	8,8	0,3	0
31/05/2016	0,8	4	55,3	18	11,3	17,5	100	117	0	17	8,3	8,4	0,1	0
19/05/2017	0,6	2,6	56,6	2	0,1	0,7	73	73	-0,4	0	7,3	7,4	0,1	0
22/01/2018	1	8,5	55,4	7,7	8,2	40,4	100	107	0	6,7	8,4	8,6	0,2	0

A : lame d'eau (m) ; B : débit de base ($m^3.s^{-1}$) ; C : niveau de nappe (m) ; D : précipitations totales (mm) ; E : précipitations efficaces (mm) ; F : cumul de précipitations efficaces sur sept jours (mm) ; G : réserve utile (mm) ; H : reconstitution de la réserve utile (mm) ; I : chargement de la réserve utile (mm) ; J : surplus hydrologique (mm) ; K : hauteur d'eau en mer prédite (m ZH) ; L : hauteur d'eau en mer observée (m ZH) ; M : surcote (m) ; N : durée de blocage des écoulements (h).

À l'embouchure de **La Bresle**, 19 débordements de cours d'eau ont été recensés avec des lames d'eau variant de 1,08 m (le 28 décembre 1999) à 0,32 m (le 7 février 2017) (Tableau 4.12). La valeur moyenne de la lame d'eau est de 0,57 m avec un écart type σ = 0,17. Les **plus fortes hauteurs d'eau en mer observées et concomitantes aux débordements de cours d'eau**

se sont produites **le 28 décembre 1999 avec 8,7 m ZH ainsi que le 28 février 2010 avec 10,1 m ZH.**

Tableau 4.12. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure de La Bresle (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées)

Date	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
28/12/1999	1,08	16,9	11,2	13,4	12,3	66,2	100	112	12	16,4	8,72	**8,72**	**0**	**0**
10/04/2001	0,98	16	10,7	0,6	1,1	11	98	98	-2	0	9,3	9,5	0,4	1
20/03/2002	0,82	13,2	10,8	2,4	2,6	7,6	100	101	0	0,7	7,9	7,9	0,4	0
02/01/2003	0,67	11,9	11,2	3,8	6,8	35,1	100	103	0	2,6	9,2	**9,2**	**0**	**0**
01/02/2004	0,37	7,1	11,3	1,8	0,6	8,4	100	100	-0,1	0	7,1	**6,9**	**0**	**0**
19/12/2004	0,42	6,8	11,5	1,4	5,8	22	100	100	0	0,1	7,7	7,7	0,4	0
20/02/2006	0,37	5,9	11,4	4	7	29	100	103	0	3,3	7,8	7,6	0,2	0
20/03/2007	0,47	7,8	11,4	4	0,1	0,7	93	93	2,5	0	9,8	8	0,4	2
28/05/2008	0,59	10,3	11,2	0	1,5	5	97	97	-3	0	7,4	**7,4**	**0**	**0**
10/02/2009	0,47	8,3	11,3	0	4	12,4	99	99	-1,4	0	9,7	9,9	0,4	0
28/02/2010	0,44	10,4	11,3	5,8	5,5	29,5	100	105	0	4,9	9,8	10,1	1	2
14/11/2010	0,5	9,4	11,4	4,4	15,1	75	100	104	0	3,7	6,9	7,2	0,6	0
16/12/2011	0,49	9,2	11,3	2,2	7,3	44,2	100	102	0	1,7	8,2	8,5	1,1	0
23/12/2012	0,49	11	11,1	8,8	11,4	40,8	100	108	0	8,2	7,6	7,9	0,6	0
01/02/2014	0,53	11,6	11,1	0,2	3,8	34,5	99	99	-1,4	0	9,8	9,9	0,7	2
01/02/2015	0,55	12,1	11,3	1,6	2,5	19,5	100	101	0	0,5	8,5	8,8	0,4	0
11/02/2016	0,59	12,6	11,4	9,3	9,3	41,7	100	109	0	8,5	9,7	9,9	0,4	2
07/02/2017	0,32	8	11,6	0,4	4,9	39,2	99	99	-0,6	0	8,5	8,3	0,3	0
23/01/2018	0,85	13,6	11	0,8	4,4	37,5	100	101	0	0,6	8,1	8,3	0,3	0

A : lame d'eau (m) ; B : débit de base ($m^3.s^{-1}$) ; C : niveau de nappe (m) ; D : précipitations totales (mm) ; E : précipitations efficaces (mm) ; F : cumul de précipitations efficaces sur sept jours (mm) ; G : réserve utile (mm) ; H : reconstitution de la réserve utile (mm) ; I : chargement de la réserve utile (mm) ; J : surplus hydrologique (mm) ; K : hauteur d'eau en mer prédite (m ZH) ; L : hauteur d'eau en mer observée (m ZH) ; M : surcote (m) ; N : durée de blocage des écoulements (h).

Le nombre d'individus (dates) utilisé pour le modèle RLM selon chacune des trois situations hydrodynamiques a été synthétisé ci-dessous (Tableau 4.13). Sur La Touques, environ 15 % des dates sont conservés après le tri effectué grâce à l'analyse factorielle. Sur le Dun, 6,49 % des individus sont conservés, 11,5 % sur L'Yères et 10 % sur La Bresle. Pour la situation hydrodynamique n°3, seulement 0,19 % des individus sont conservés sur la Touques, 0,24 % sur le Dun, 0,27 % sur L'Yères et 0,26 % sur La Bresle.

Tableau 4.13. Nombre d'individus utilisés pour les modèles de régression linéaire multiple (RLM) en fonction des trois situations hydrodynamiques (S.H.)

	La Touques		*Le Dun*		*L'Yères*		*La Bresle*	
	E*	F**	E*	F**	E*	F**	E*	F**
S.H. n°1	12 785	100 %	8 756	100 %	12 780	100 %	6 968	100 %
S.H. n°2	1 910	14,94 %	568	6,49 %	1 472	11,52 %	699	10,03%
S.H. n3	24	0,19 %	21	0,24 %	35	0,27 %	18	0,26 %

E* : nombre d'individus (date) ; F** : fréquence des individus ; S.H. : situation hydrodynamique.

4.3.2. Présentation des résultats des modèles RLM sur les effets de concomitance hydrologique

Cette section présente les paramètres des modèles RLM de type LET, LED, LEY et LEB, les coefficients standardisés (β), les paramètres globaux d'adéquation (*Goodness of fit statistics*), ainsi que la prédiction des modèles, et les résultats des modèles RLM sur les lames d'eau excédentaire pour chacune des embouchures (LET pour La Touques, HED pour Le Dun, HEY pour L'Yères et HEB pour La Bresle). La réponse de la variable dépendante (la lame d'eau observée à la station hydrologique) est analysée grâce à 13 variables explicatives.

La situation hydrodynamique n°1 (toutes dates confondues) est dénommée par la particule « _1 ». La situation hydrodynamique n°2 (dates des situations propices à un blocage des écoulements par la mer) est qualifiée par la particule « _2 ». La situation hydrodynamique n°3 (date de débordement des cours d'eau) est qualifiée par la particule « _3 ».

L'intervalle de confiance est fixé à 95 % pour une tolérance globale fixée à 1.10^{-4}. Le *software xlstat*[8] a été utilisé pour l'ensemble des analyses statistiques. L'effet de blocage des écoulements par la mer (**LEE : lame d'eau excédentaire**) est calculé par différence entre la lame d'eau mesurée par la station hydrologique (**LE : lame d'eau mesurée**) moins la réponse des variables hydrologiques et météorologiques [12].

$$[12] \quad LEE = LE - (LE_{v.hydrologiques} + LE_{v.météorologiques})$$

$LE_{v.hydrologiques}$ est la lame d'eau déterminée par les variables hydrologiques et $LE_{v.\text{météorologiques}}$ est la lame d'eau déterminée par les variables météorologiques.

La section 4.3.2 est une présentation factuelle des modèles de régression appliqués aux différentes embouchures et la section 4.3.3 est la synthèse de ces modèles de régression et le choix retenus à l'analyse des effets de blocage des écoulements.

4.3.2.1. Réponse des lames d'eau à l'embouchure de la Touques (modèles LET)

a. Caractéristiques des modèles LET

Les modèles LET ont des coefficients de détermination (R^2) compris entre 0,707, pour le modèle LET_1 et 0,633 pour le modèle LET_2. Avec un R^2 ajusté de 0,631, le modèle LET_2 est de meilleure qualité que le modèle LET_3 avec un R^2 ajusté à 0,555. Au regard des erreurs quadratiques (RMSE), les marges d'erreur des modèles LET_1 et LET_2 sont similaires, avec un indice respectif de 0,149 et 0,188 tandis que les marges d'erreur du modèle LET_3 sont de l'ordre 0,5. Sur les 13 variables, les valeurs β liées aux surplus hydrologiques (Sh) et aux surcotes n'apportent pas de réponses significatives et ont été exclues pour les trois modèles.

Pour la **situation hydrodynamique n°1** (modèle LET_1), les corrélations sont (Figure 4.28) :

- Pour les *Variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,34 (niveaux piézométriques) et 0,80 (débits de base) ;
- Pour les *Variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre 0,01 (chargement de la réserve utile) et 0,54 (cumul des précipitations efficaces sur sept jours) ;
- Pour les *Variables marines* et la lame d'eau comprises entre – 0,03 (hauteurs d'eau prédites en mer) et 0,14 (surcotes marines).

[8] *Logiciel (payant) disponible sur : https://www.xlstat.com/*

Le **modèle LET_1** explique 70 % de la variance avec peu d'erreurs sur la contribution des variables dans la réponse de la lame d'eau (test de Student sur β est en moyenne 0,028 et au maximum de 0,29). La somme des coefficients des variables marines est β = 0,001.

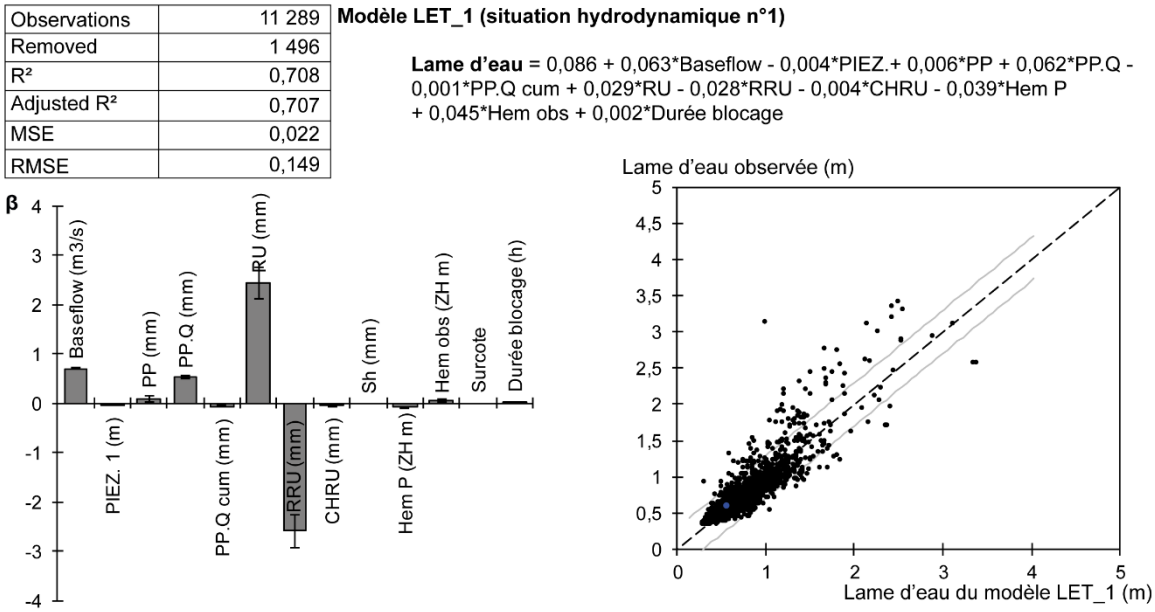


Figure 4.28 : Modèle de régression linéaire multiple LET_1 – lame d'eau excédentaire sur La Touques pour la situation hydrodynamique n°1

Pour la **situation hydrodynamique n°2** (modèle LET_2), les corrélations sont (Figure 4.29) :

- Pour les *Variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,24 (niveaux piézométriques) et 0,74 (débits de base) ;
- Pour les *Variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre 0,08 (précipitation) et 0,38 (cumul des précipitations efficaces sur sept jours) ;
- Pour les *Variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,08 (hauteurs d'eau prédites en mer) et 0,24 (surcotes).

Le **modèle LET_2** explique 63 % de la variance, mais avec davantage d'erreurs sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,27 et au maximum de 0,74). Le rôle des variables marines est cependant beaucoup plus important sur la réponse de la lame d'eau (somme des coefficients des variables marines β = 0,07).

Observations	1 910
Removed	7 260
R²	0,633
Adjusted R²	0,631
MSE	0,035
RMSE	0,188

Modèle LET_2 (situation hydrodynamique n°2)

Lame d'eau = 0,13 + 0,062*Baseflow - 0,012*PIEZ.- 0,002*PP + 0,058*PP.Q - 0,002*PP.Q cum + 0,015*RU - 0,018*RRU + 0,004*CHRU - 0,029*Hem P + 0,034*Hem obs + 0,003*Durée blocage

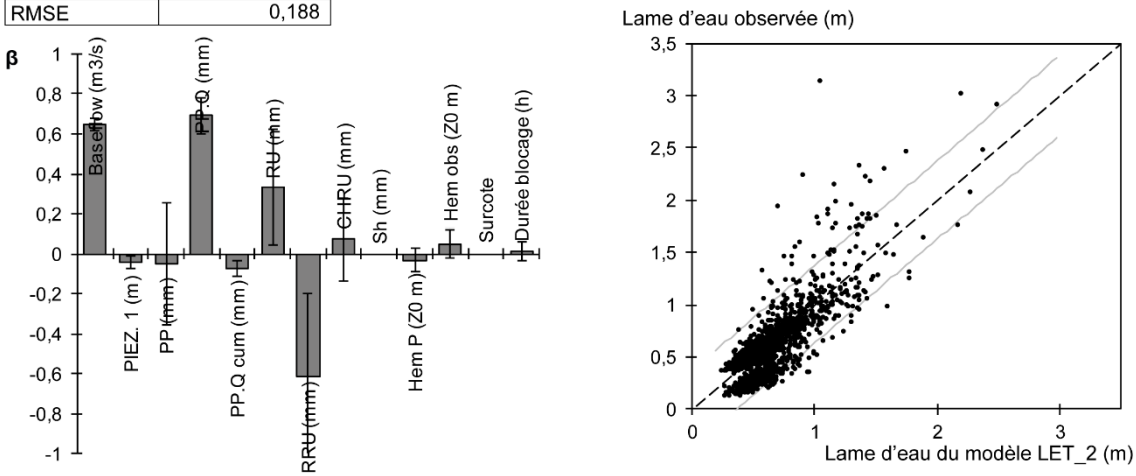


Figure 4.29 : Modèle de régression linéaire multiple LET_2 – lame d'eau excédentaire sur La Touques pour la situation hydrodynamique n°2

Pour la **situation hydrodynamique n°3** (modèle LET_3), les corrélations sont (Figure 4.30) :

- Pour les *Variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,23 (niveaux piézométriques) et 0,52 (débits de base) ;
- Pour les *Variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,14 (précipitation) et 0,38 (cumul des précipitations efficaces sur sept jours) ;
- Pour les *Variables marines* et la lame d'eau comprises entre - 0,09 (hauteurs d'eau observées en mer) et 0,05 (surcotes).

Observations	24
Removed	0
R²	0,768
Adjusted R²	0,555
MSE	0,253
RMSE	0,503

Modèle LET_3 (situation hydrodynamique n°3)

Lame d'eau = 109,05 + 0,037*Baseflow - 0,042*PIEZ.- 0,711*PP + 0,142*PP.Q - 0,009*PP.Q cum - 1,777*RU + 0,671*RRU + 0,138*CHRU - 0,03*Hem P + 0,04*Hem obs + 0,02*Durée blocage

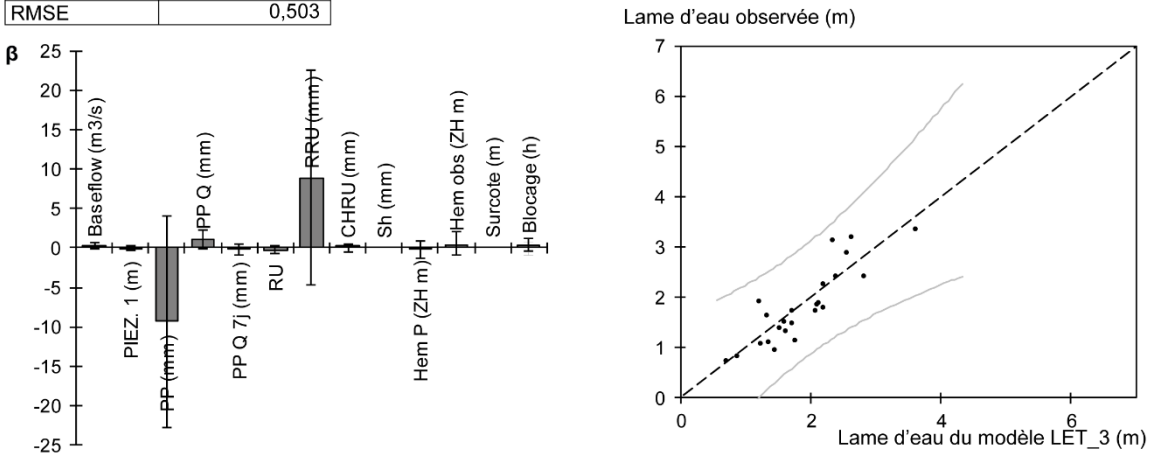


Figure 4.30 : Modèle de régression linéaire multiple LET_3 – lame d'eau excédentaire sur La Touques pour la situation hydrodynamique n°3

Le **modèle LET_3** explique 55 % de la variance, mais engendre des erreurs très importantes sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,42 et au maximum de 0,77). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,03.

b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure de La Touques

Le **modèle LET_1** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 4 cm** (station de Pont-L'Évêque) avec un maximum d'environ 10 cm survenu le 12 janvier 2017 durant la tempête Egon, le 16 octobre 1987, avec 9,5 cm de lame d'eau excédentaire et le 17 décembre 2004 avec 9,3 cm de lame d'eau excédentaire (Figure 4.31).

Le **modèle LET_2** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 5 cm** avec des valeurs maximales de lames d'eau de 8,9 cm (le 12 janvier 2017 durant la tempête Egon), de 8,2 cm (le 26 février 1990 durant la tempête Viviane et Wiebke) et de 8,1 cm (17 décembre 2004 durant la tempête Dagmar).

Le **modèle LET_3** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 10 cm**. Les valeurs maximales de lames d'eau excédentaires atteignent 19 cm (le 3 janvier 2018 durant la tempête Eleanor), 18,4 cm (le 11 janvier 1993) et 18,2 cm (e 4 janvier 2018 durant la tempête Eleanor).

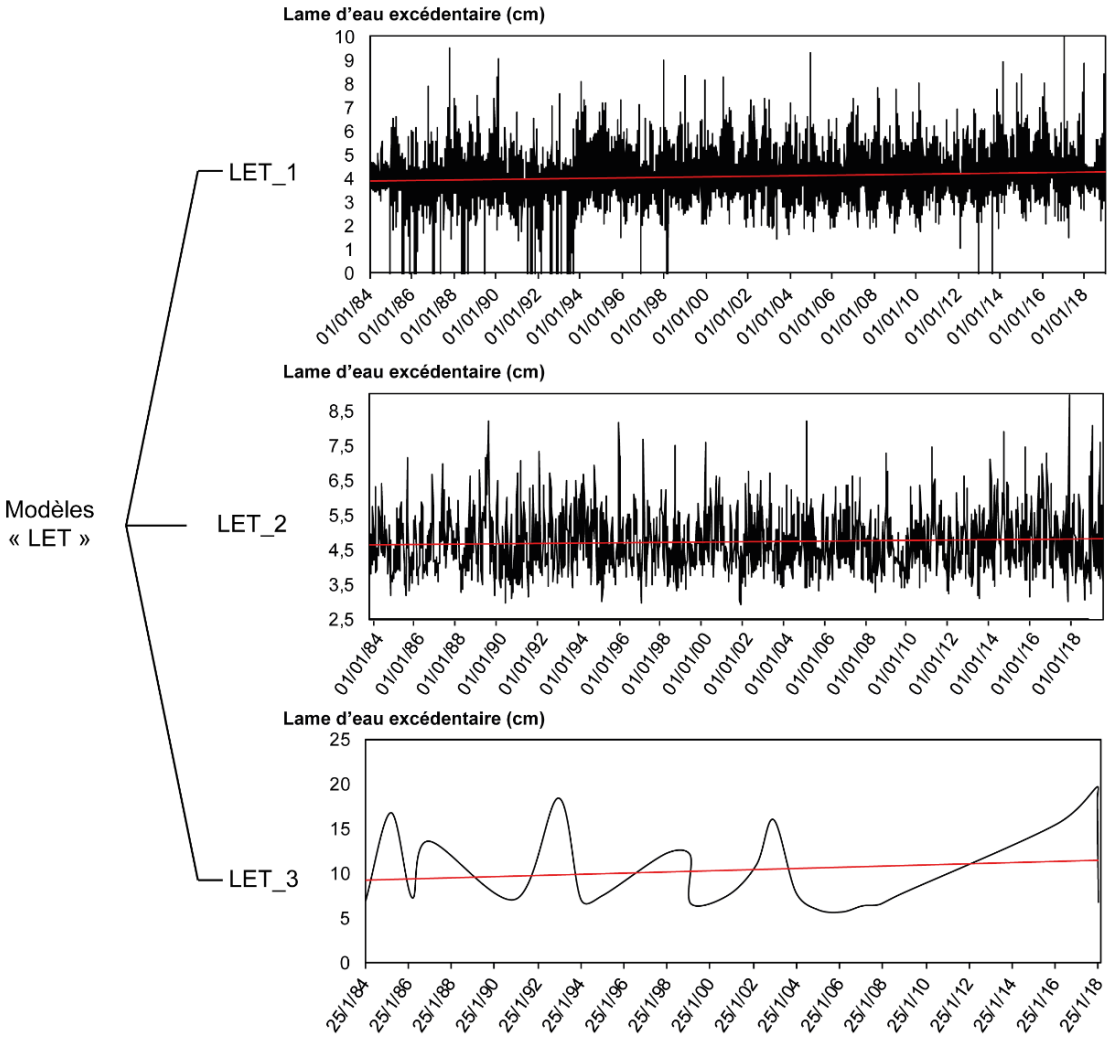


Figure 4.31 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure de La Touques (modèles LET)

4.3.2.2. Réponse des lames d'eau à l'embouchure du Dun (modèles LED)

a. Caractéristiques des modèles LED

Les modèles LED ont des coefficients de détermination (R^2) compris entre 0,596, pour le modèle LED_1 et 0,441 pour le modèle LED_2. Avec un R^2 ajusté de 0,594, le modèle LED_1 est de meilleure qualité que le modèle LED_3 avec un R^2 ajusté à 0,150. Au regard des erreurs quadratiques (RMSE), les marges d'erreur des modèles LED_1 et LED_2 sont similaires, avec un indice respectif de 0,051 et 0,098 tandis que les marges d'erreur du modèle LED_3 sont de l'ordre 0,235. Sur les 13 variables, les valeurs β liées aux surplus hydrologiques (Sh) n'apportent pas de réponses significatives et ont été exclues pour les modèles LED_1 et LED_2. Les surcotes marines n'apportent également pas de réponses significatives sur le modèle LED_3.

Pour la **situation hydrodynamique n°1** (modèle LED_1), les corrélations sont (Figure 4.32) :

- Pour les *Variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,42 (niveaux piézométriques) et 0,70 (débits de base) ;
- Pour les *Variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre 0,16 (réserve utile) et 0,48 (précipitations efficaces) ;
- Pour les *Variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,17 (hauteurs d'eau prédites en mer) et 0,23 (surcotes marines).

Le **modèle LED_1** explique 59 % de la variance avec de faibles erreurs sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,09 et au maximum de 0,38). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,07.

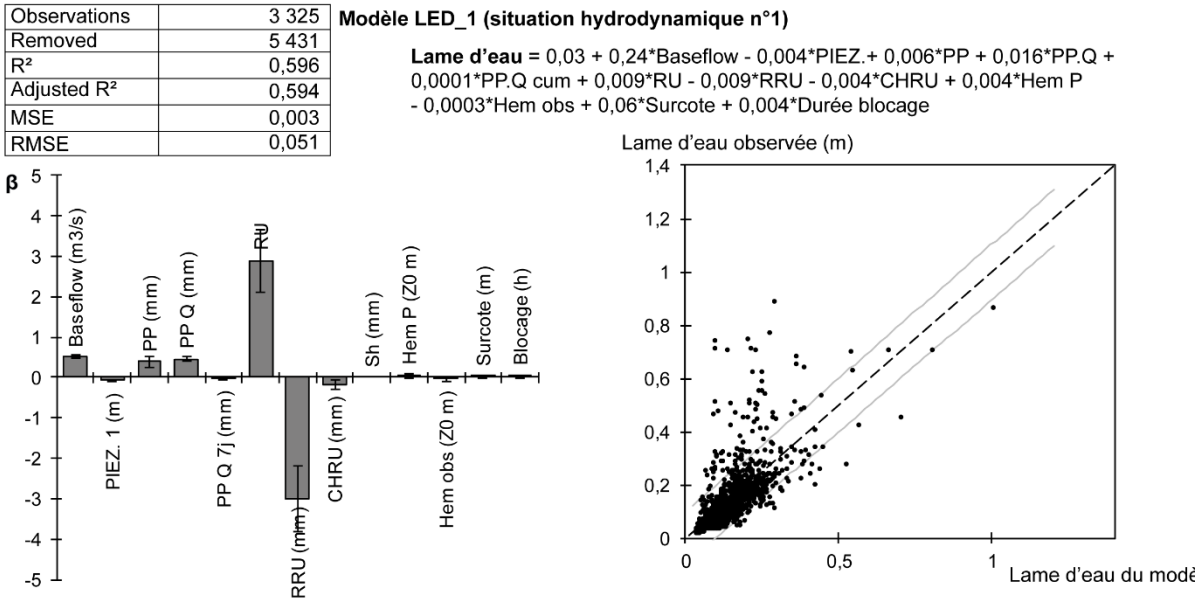


Figure 4.32 : Modèle de régression linéaire multiple LED_1 – lame d'eau excédentaire sur Le Dun pour la situation hydrodynamique n°1

Pour la **situation hydrodynamique n°2** (modèle LED_2), les corrélations sont (Figure 4.33) :

- Pour les *Variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre -0,18 (niveaux piézométriques) et 0,57 (débits de base) ;
- Pour les *Variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,08 (réserve utile) et 0,39 (précipitations efficaces) ;
- Pour les *Variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,05 (surcotes) et 0,27 (hauteurs d'eau prédites en mer).

Le **modèle LED_2** explique 43 % de la variance et avec davantage d'erreurs sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,28 et au maximum de 0,91). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,21.

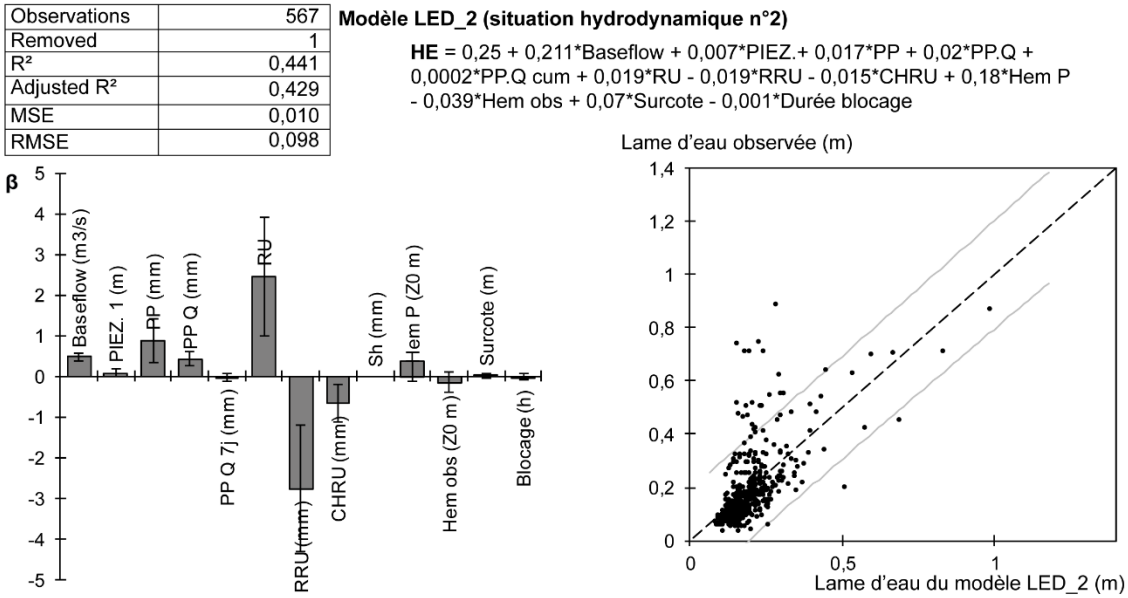


Figure 4.33 : Modèle de régression linéaire multiple LED_2 – lame d'eau excédentaire sur Le Dun pour la situation hydrodynamique n°2

Pour la **situation hydrodynamique n°3** (modèle LED_3), les corrélations sont (Figure 4.34) :

- Pour les *Variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,27 (niveaux piézométriques) et 0,35 (débits de base) ;
- Pour les *Variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,03 (réserve utile) et 0,42 (cumuls des précipitations efficaces sur sept jours) ;
- Pour les *Variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,16 (surcotes) et 0,29 (hauteurs d'eau observées en mer).

Le **modèle LED_3** explique 48 % de la variance, mais engendre des erreurs très importantes sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,63 et au maximum de 0,92). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,58.

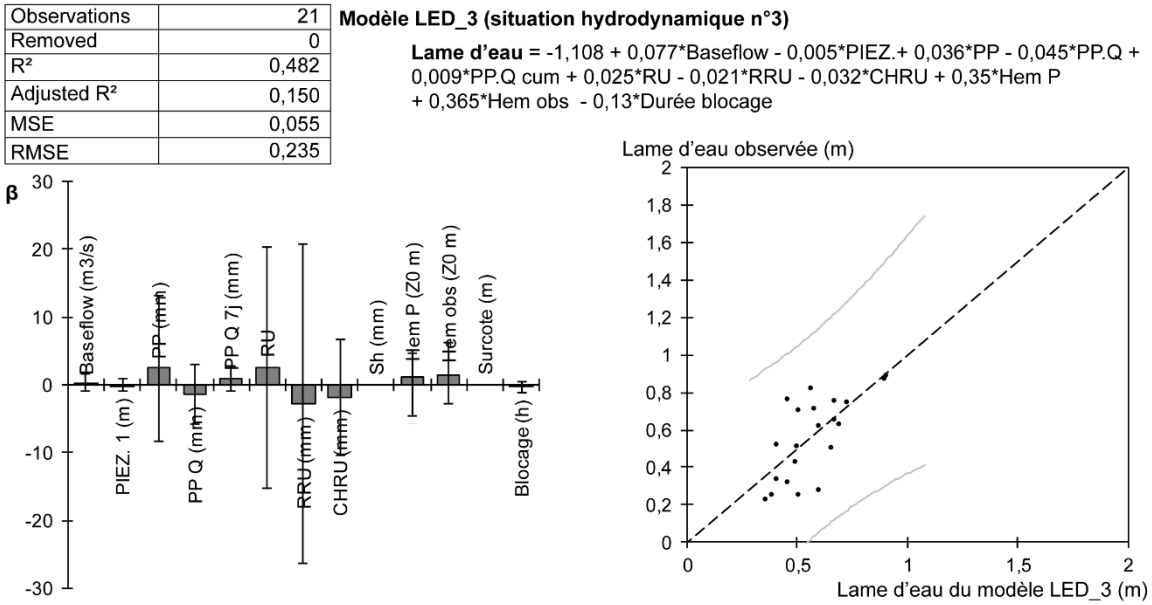


Figure 4.34 : Modèle de régression linéaire multiple LED_3 – lame d'eau excédentaire sur Le Dun pour la situation hydrodynamique n°3

b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure du Dun

Le **modèle LED_1** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 1,5 cm** (station de Bourg-Dun) avec un maximum d'environ 3,5 cm survenus le 2 février 2006, le 21 janvier 2007, avec 3,4 cm de lame d'eau excédentaire et le 2 février 2006 avec également 3,4 cm de lame d'eau excédentaire (Figure 4.35).

Le **modèle LED_2** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 4 cm** avec des valeurs maximales de lames d'eau de 4,8 cm (le 2 mars 2014 et le 28 avril 2002) et de 4,7 cm (le 1er mars 2010, post-tempête Xynthia).

Le **modèle LED_3** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 8 cm**. Les valeurs maximales de lames d'eau excédentaires atteignent 20 cm (le 13 novembre 2010 et le 24 décembre 2013).

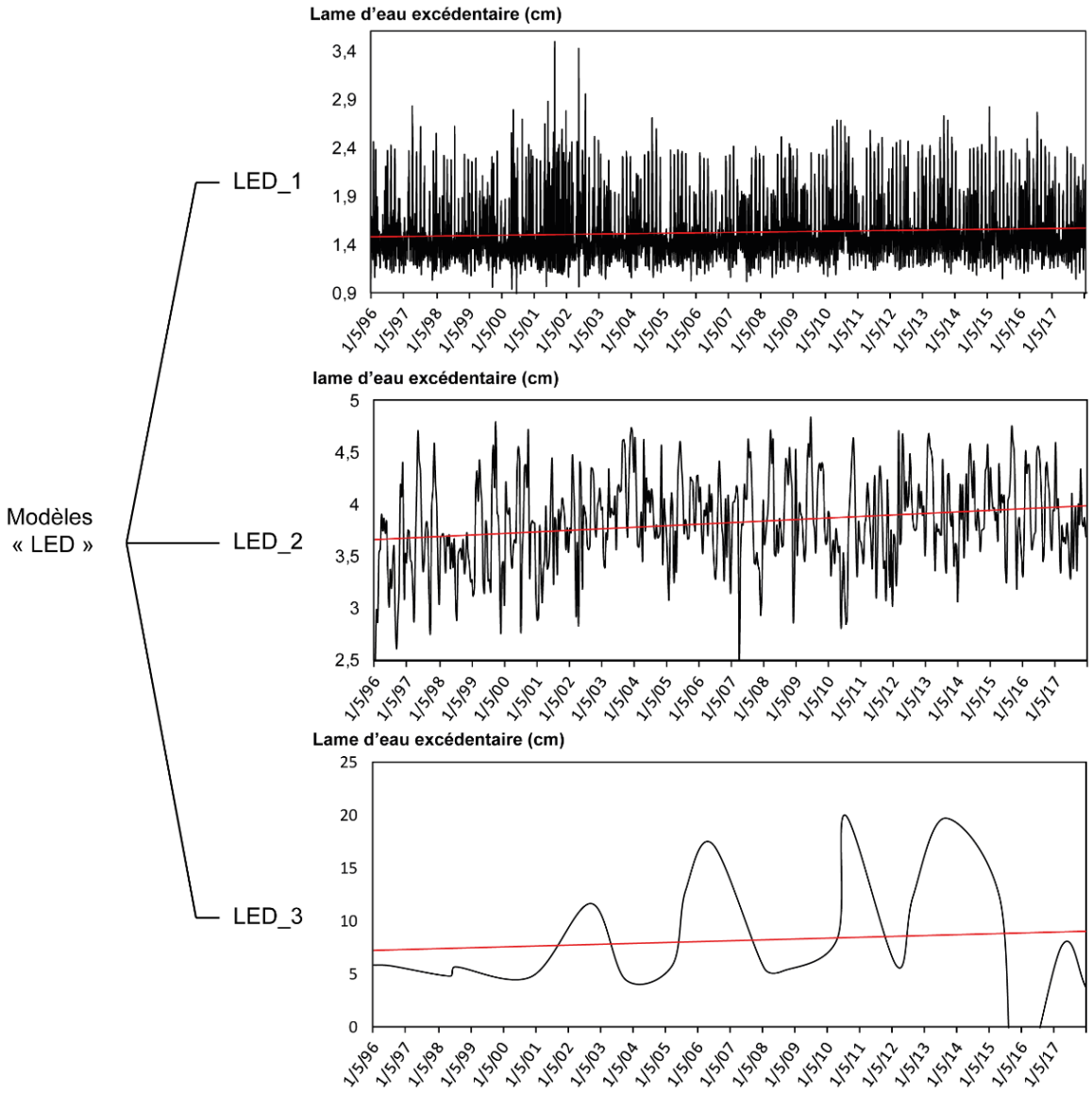


Figure 4.35 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure du Dun (modèles LED)

4.3.2.3. Réponse des lames d'eau à l'embouchure de L'Yères (modèles LEY)

a. Caractéristiques des modèles LEY

Les modèles LEY ont des coefficients de détermination (R^2) compris entre 0,942, pour le modèle LEY_1 et 0,743 pour le modèle LEY_3. Avec un R^2 ajusté de 0,942, le modèle LEY_1 est de meilleure qualité que le modèle LEY_3 avec un R^2 ajusté à 0,620. Au regard des erreurs quadratiques (RMSE), les marges d'erreur des modèles LEY_1 et LEY_2 sont similaires, avec un indice respectif de 0,02 et 0,03 tandis que les marges d'erreur du modèle LEY_3 sont de l'ordre 0,1. Sur les 13 variables, les valeurs β liées aux surplus hydrologiques (Sh) ont été exclues pour les trois modèles.

Pour la **situation hydrodynamique n°1** (modèle LEY_1), les corrélations sont (Figure 4.36) :

- Pour les *variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,64 (niveaux piézométriques) et 0,92 (débits de base) ;
- Pour les *variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre 0,07 (précipitations) et 0,36 (reconstitution de la réserve utile) ;
- Pour les *variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,02 (durées de blocage des écoulements) et 0,10 (surcotes marines).

Le **modèle LEY_1** permet d'expliquer 94 % de la variance avec de faibles erreurs (test de Student sur β est en moyenne de 0,22 et au maximum de 0,91). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,02.

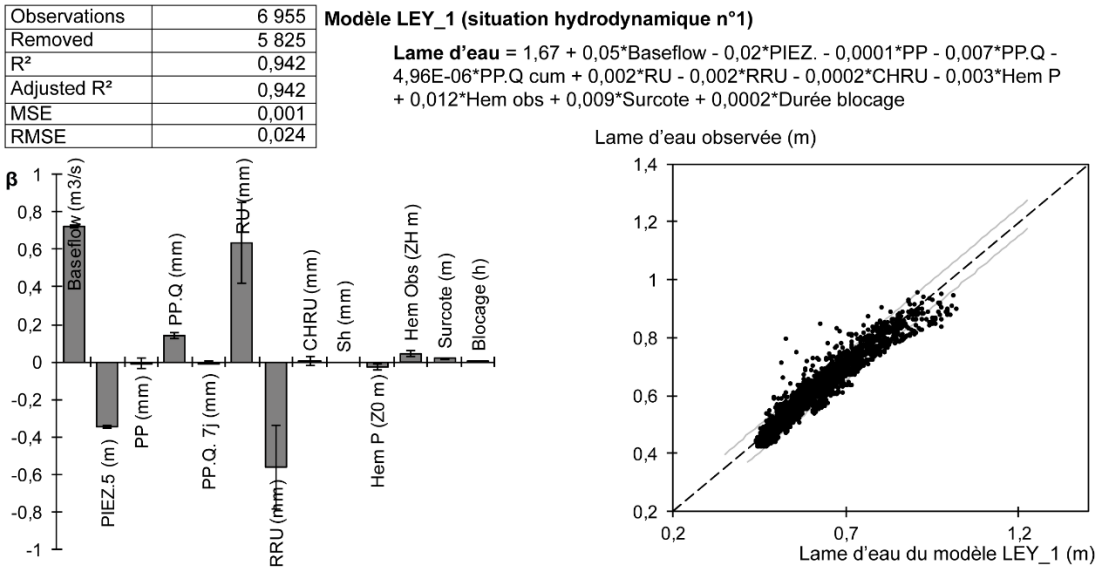


Figure 4.36 : Modèle de régression linéaire multiple LEY_1 – lame d'eau excédentaire sur L'Yères pour la situation hydrodynamique n°1

Pour la **situation hydrodynamique n°2** (modèle LEY_2), les corrélations sont (Figure 4.37) :

- Pour les *variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,61 (niveaux piézométriques) et 0,90 (débits de base) ;
- Pour les *variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre 0,03 (cumul des précipitations efficaces sur sept jours) et 0,18 (chargement de la réserve utile) ;
- Pour les *variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,05 (surcotes) et 0,18 (hauteurs d'eau observées en mer).

Le **modèle LEY_2** explique 90 % de la variance et avec moins d'erreurs sur la contribution des variables que le modèle LEY_1 (test de Student sur β est en moyenne de 0,36 et au maximum de 0,19). Le rôle des variables marines est plus important avec une somme des coefficients des variables marines égale à β = 0,06.

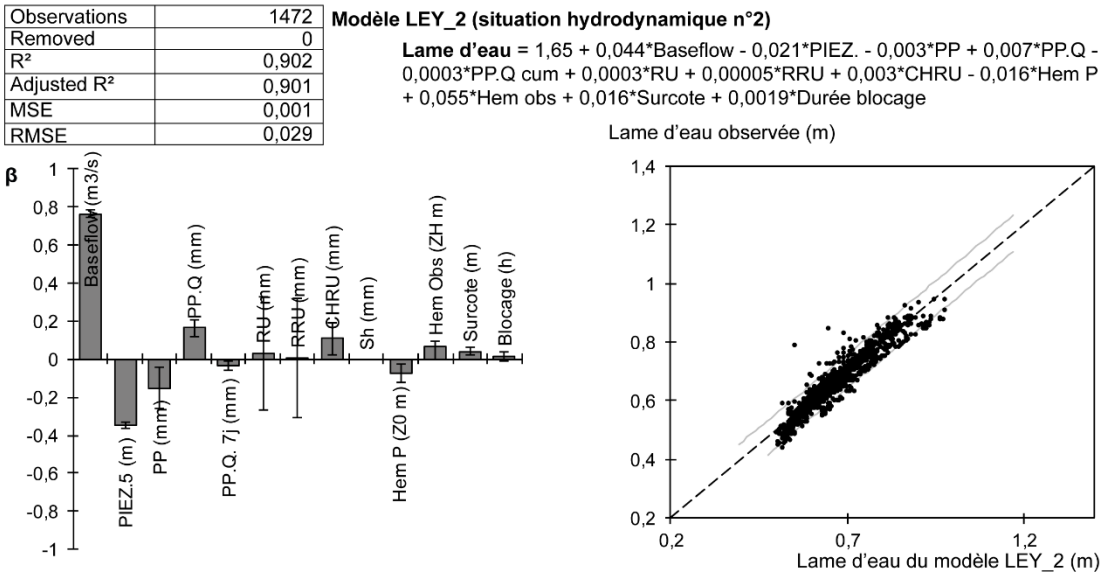


Figure 4.37 : Modèle de régression linéaire multiple LEY_2 – lame d'eau excédentaire sur L'Yères pour la situation hydrodynamique n°2

Pour la **situation hydrodynamique n°3** (modèle LEY_3), les corrélations sont (Figure 4.38) :

- Pour les *variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,29 (niveaux piézométriques) et 0,73 (débits de base) ;
- Pour les *variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,09 (chargement de la réserve utile) et 0,55 (cumul des précipitations efficaces sur sept jours) ;
- Pour les *variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,13 (surcotes marines) et 0,26 (hauteurs d'eau observées en mer).

Le **modèle LEY_3** explique 62 % de la variance, mais engendre des erreurs très importantes sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,63 et au maximum de 0,94). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,04.

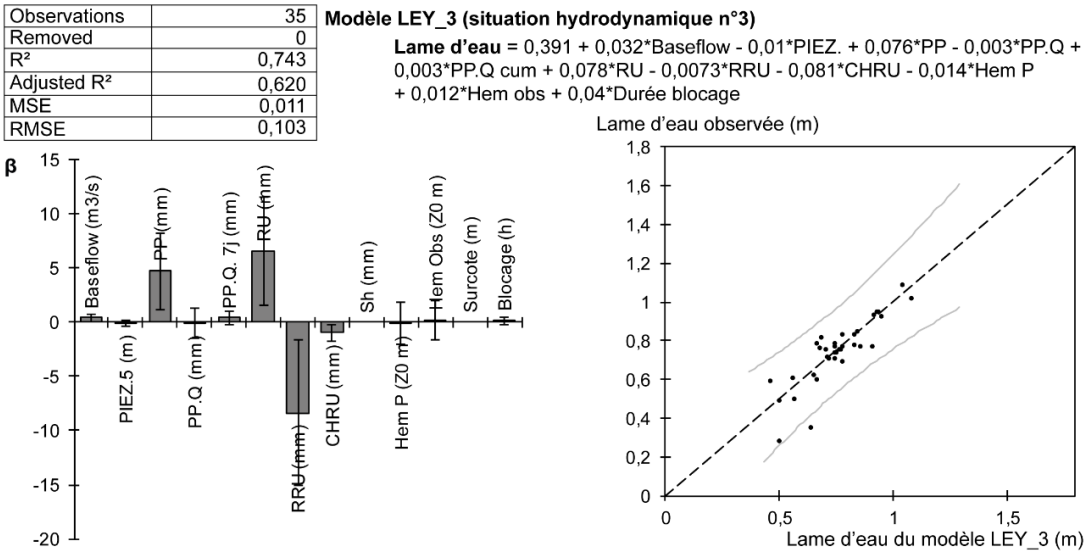


Figure 4.38 : Modèle de régression linéaire multiple LEY_3 – lame d'eau excédentaire sur L'Yères pour la situation hydrodynamique n°3

b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure de L'Yères

Le **modèle LEY_1** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 8 cm** (station Touffreville-sur-Eu) avec un maximum d'environ 10,1 cm survenu le 3 janvier 2018 lors de la tempête Eleanor, le 8 février 2016, avec 10 cm de lame d'eau excédentaire et le 26 février 2002, durant la tempête Dirk, avec 9,9 cm de lame d'eau excédentaire (Figure 4.39).

Le **modèle LEY_2** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 37 cm** avec des valeurs maximales de lames d'eau de 43,5 cm (les 22 et 23 novembre 1984 en situation de tempête) et de 42,9 cm (le 27 février 1990 durant la tempête Viviane et Wiebke).

Le **modèle LEY_3** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 26 cm**. Les valeurs maximales de lames d'eau excédentaires atteignent 38 cm (le 1er mars 2014), 34 cm (le 8 mars 1989) et 33 cm (le 26 décembre 1999 lors de la tempête Lothar).

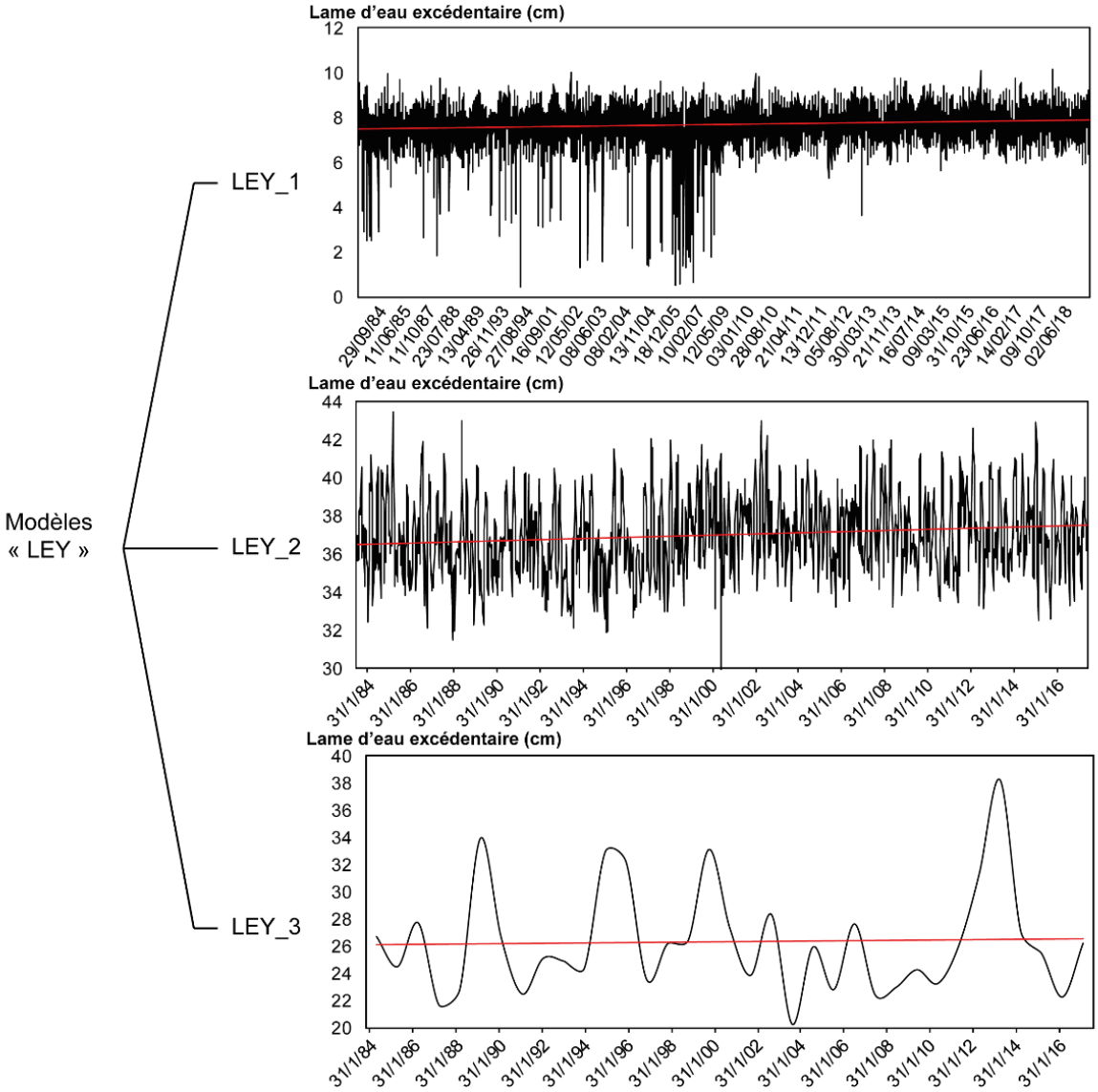


Figure 4.39 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure de L'Yères (modèles LEY)

4.3.2.4. Réponse des lames d'eau à l'embouchure de La Bresle (modèles LEB)

a. Caractéristiques des modèles LEB

Les modèles LEB ont des coefficients de détermination (R^2) compris entre 0,901, pour le modèle LEB_1 et 0,870 pour le modèle LEB_2. Avec un R^2 ajusté de 0,901, le modèle LEB_1 est de meilleure qualité que le modèle LEB_3 avec un R^2 ajusté à 0,801. Au regard des erreurs quadratiques (RMSE), les marges d'erreur des modèles LEB_1 et LEB_2 sont similaires, avec un indice respectif de 0,04 et 0,05 tandis que les marges d'erreur du modèle LEB_3 sont de l'ordre 0,08. Sur les 13 variables, les valeurs β liées aux surplus hydrologiques (Sh) ont été exclues pour les trois modèles, car ils n'apportent pas de réponses significatives.

Pour la **situation hydrodynamique n°1** (modèle LEB_1), les corrélations sont (Figure 4.40) :

- Pour les *variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,76 (niveaux piézométriques) et 0,94 (débits de base) ;
- Pour les *variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,03 (chargement de la réserve utile) et 0,32 (cumuls des précipitations efficaces sur sept jours) ;
- Pour les *variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,01 (hauteur d'eau prédite en mer) et 0,2 (surcotes marines).

Le **modèle LEB_1** permet d'expliquer 90 % de la variance avec d'importantes erreurs (test de Student sur β est en moyenne de 0,21 et au maximum de 0,92). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,03.

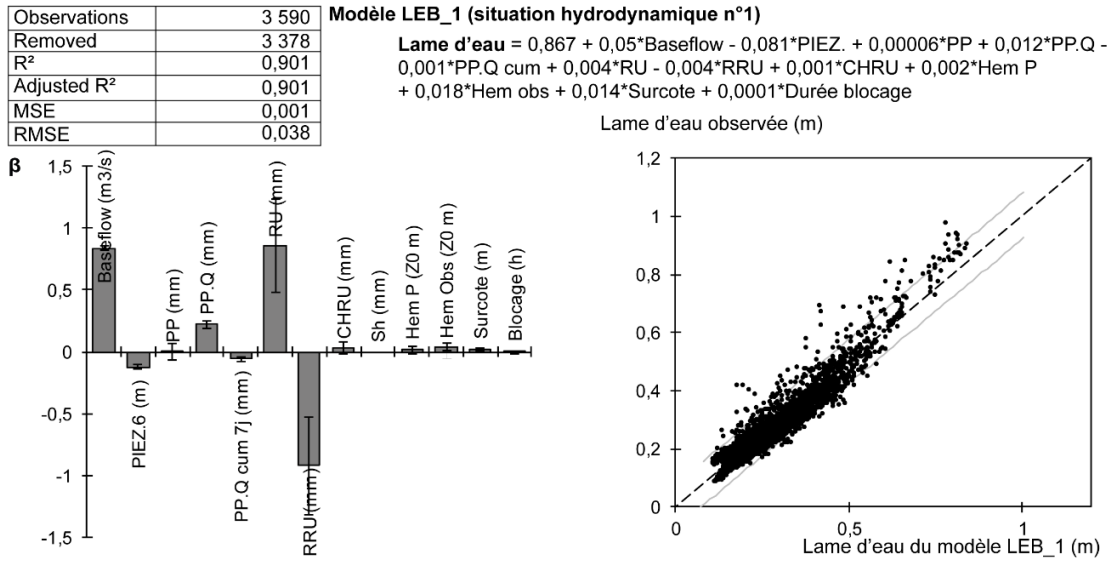


Figure 4.40 : Modèle de régression linéaire multiple LEB_1 – lame d'eau excédentaire sur La Bresle pour la situation hydrodynamique n°1

Pour la **situation hydrodynamique n°2** (modèle LEB_2), les corrélations sont (Figure 4.41) :

- Pour les *variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,77 (niveaux piézométriques) et 0,92 (débits de base) ;
- Pour les *variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,07 (surplus hydrologiques) et - 0,17 (réserve utile) ;
- Pour les *variables marines* et la lame d'eau comprises entre - 0,004 (précipitations efficaces) et 0,10 (surcotes marines).

Le **modèle LEB_2** explique 87 % de la variance et avec de très faibles erreurs sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,09 et au maximum de 0,5). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,07.

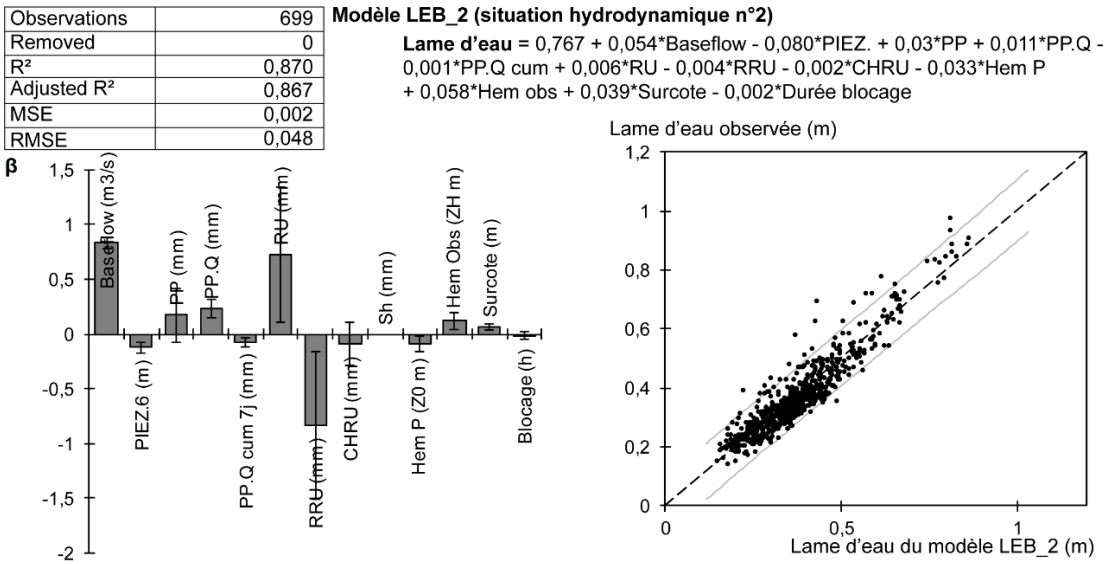


Figure 4.41 : Modèle de régression linéaire multiple LEB_2 – lame d'eau excédentaire sur La Bresle pour la situation hydrodynamique n°2

Pour la **situation hydrodynamique n°3** (modèle LEB_3), les corrélations sont (Figure 4.42) :

- Pour les *variables hydrologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,88 (niveaux piézométriques) et 0,89 (débits de base) ;
- Pour les *variables météorologiques* et la lame d'eau comprises entre - 0,03 (réserve utile) et - 0,26 (chargement de la réserve utile) ;
- Pour les *variables marines* et la lame d'eau comprises entre 0,08 (surcotes marines) et 0,22 (hauteur d'eau observée en mer).

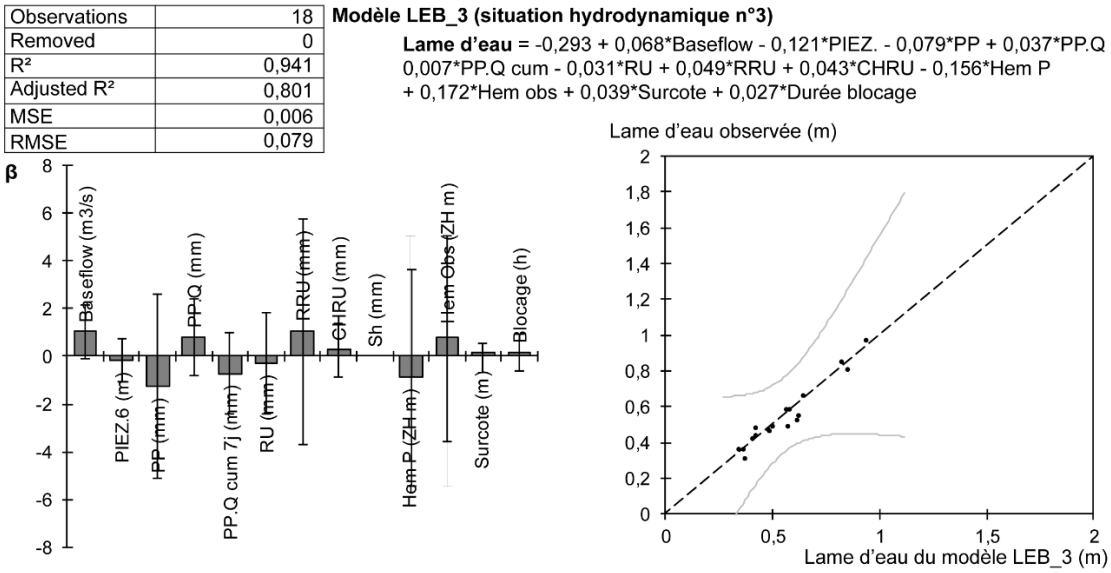


Figure 4.42 : Modèle de régression linéaire multiple LEB_3 – lame d'eau excédentaire sur La Bresle pour la situation hydrodynamique n°3

Le **modèle LEB_3** explique 80 % de la variance, mais engendre de très importantes erreurs sur la contribution des variables (test de Student sur β est en moyenne de 0,53 et au maximum de 0,72). La somme des coefficients des variables marines est égale à β = 0,08.

b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure de La Bresle

Le **modèle LEB_1** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 18 cm** (station Ponts-et-Marais) avec un maximum d'environ 22,3 cm survenu le 3 janvier 2018 lors de la tempête Eleanor, le 28 février 2010 durant la tempête Xynthia, avec 22,2 cm de lame d'eau excédentaire et 26 février 2002, avec 22,0 cm de lame d'eau excédentaire (Figure 4.43).

Le **modèle LEB_2** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 25 cm** avec des valeurs maximales de lames d'eau de 30,9 cm (le 8 février 2016 en situation de tempête) et de 30,3 cm (le 26 février 2002).

Le **modèle LEB_3** estime des lames d'eau excédentaires **moyennes de 14 cm**. Les valeurs maximales de lames d'eau excédentaires atteignent 24,0 cm (le 11 février 2016), 23,6 cm le 28 février 2010 durant la tempête Xynthia et 19 cm (le 1er février 2014 durant la tempête Qumaira).

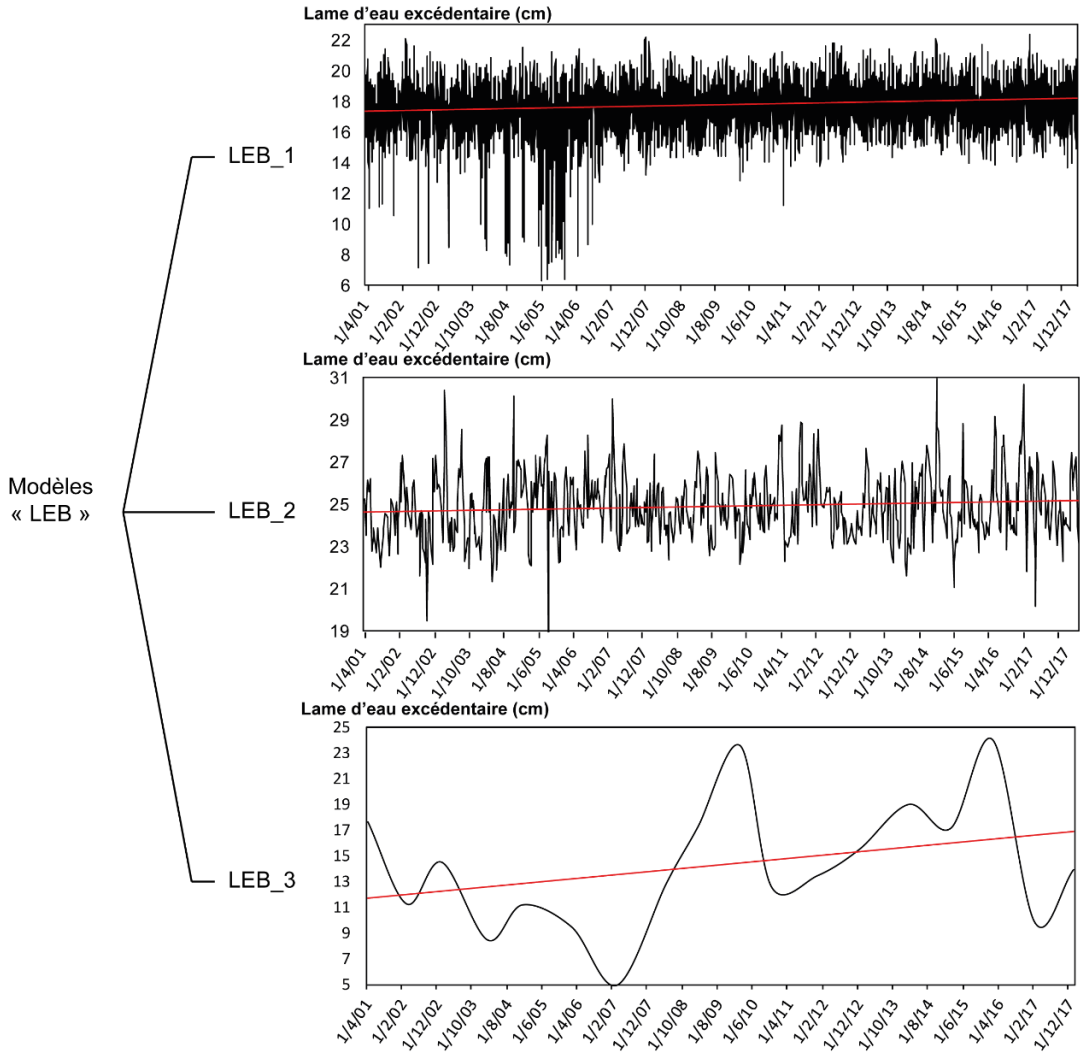


Figure 4.43 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure de La Bresle (modèles LEB)

4.3.3. Synthèse des modèles LET, LED, LEY et LEB et des lames d'eau excédentaires

Pour rappel, la mise en place de plusieurs modèles de régression linéaires multiples pour chaque embouchure avait pour but d'apporter la meilleure réponse de la lame d'eau aux effets de blocage des écoulements. Pour chacun des modèles de régression, les effets de blocage ont été définis grâce à la somme des variables marines (β) et traduits par la suite sous forme de lame d'eau excédentaire (LE). Le **choix final du modèle de régression** pour chacune des embouchures et pour chacune des situations hydrodynamiques repose sur le meilleur équilibre entre la **plus forte réponse de la lame d'eau** aux variables marines, à la **plus forte explication de la variance globale du modèle (R^2 réajusté)** et **aux plus faibles erreurs quadratiques (RMSE)** des modèles de régression (Tableau 4.14).

Tableau 4.14. Synthèse des apports et marges d'erreurs des modèles de type « _1 », « -2 » et « _3 » par embouchure

SH[1]	« _1 »			« _2 »			« _3 »		
P[2]	R^2 adj[3]	RMSE[4]	β mer[5]	R^2 adj[3]	RMSE[4]	β mer[5]	R^2 adj[3]	RMSE[4]	β mer[5]
LET	**0,71**	**0,15**	**>0,01**	**0,63**	**0,19**	**0,07**	**0,56**	**0,50**	**0,03**
LED	0,59	0,05	0,07	0,43	0,10	0,21	0,15	0,24	0,58
LEY	0,94	0,02	0,02	0,90	0,03	0,06	0,62	0,10	0,04
LEB	0,90	0,04	0,03	0,87	0,05	0,07	0,80	0,08	0,08

SH[1] correspond aux situations hydrodynamiques ; P[2] correspond aux paramètres des modèles RLM ; R^2 adj[3] est le coefficient de détermination réajusté ; RMSE[4] est l'erreur quadratique du modèle de régression ; β mer[5] est la somme des coefficients β liés aux variables marines

L'analyse croisée des paramètres des modèles de régression aux différentes embouchures et pour les différentes situations hydrodynamiques montre que **les modèles de régression « _2 »** (*i.e.* situation propice à des effets de blocage des écoulements par la mer) **apportent systématiquement le meilleur équilibre** entre une forte contribution des variables marines, une forte explication de la variance et de faibles erreurs quadratiques. Ce meilleur équilibrage est lié au fait que seules les dates où la mer a eu une influence sur la lame d'eau ont été retenues (déterminée grâce à l'analyse multifactorielle de type ACP). Les résultats des modèles de type « _1 » et « _2 » restent cependant intéressants, car ils permettent de mettre en avant deux points majeurs en considérant :

(1) L'ensemble des chroniques sans distinction (situation « _1 »), il apparaît que la contribution des variables marines sur la lame d'eau à l'embouchure est assez faible ce qui permet de confirmer que les **phénomènes de blocage par la mer sont des situations « exceptionnelles »** et ne relève pas d'une interaction quotidienne ;

(2) La totalité des situations de débordement de cours d'eau (situation « _2 »), le **phénomène de blocage des écoulements par la mer va dépendre des embouchures considérées**, et aussi de la distance de la station hydrologique à l'exutoire utilisée dans cette analyse (*cf.* infra). Plus précisément, l'embouchure de La Touques semble être impactée assez faiblement en termes de réponse de la lame d'eau aux variables marines (β = 0,03) en période de débordement contrairement au bassin du Dun (β = 0,58). Ce résultat peut signifier que l'embouchure du Dun doit être dans une situation de blocage minimum pour qu'un débordement puisse avoir lieu tandis que sur La Touques la situation de blocage n'a qu'un rôle aggravant.

La suite des recherches sur les effets de blocage des écoulements par la mer repose sur les modèles de type « _2 ». Les lames d'eau excédentaires, c'est-à-dire les lames d'eau engendrées par un effet de blocage des écoulements par la mer, ont été synthétisées dans le Tableau 4.15 présenté ci-après.

Tableau 4.15. Synthèse des lames d'eau excédentaires pour les situations hydrodynamiques n°2 (situation de blocage potentiel des écoulements par la mer)

	Distance de la station hydrologique à l'exutoire (km)	Min. Lame d'eau excédentaire (cm)	Moy. Lame d'eau excédentaire (cm)	Max. Lame d'eau excédentaire (cm)
La Touques	13,0	2,9	5,0	8,9
Le Dun	3,8	2,4	4,0	4,8
L'Yères	3,9	29,9	37,0	43,5
La Bresle	5,7	15,1	24,8	30,9

« Min. » est la valeur minimum, « Moy. » est la valeur moyenne et « Max. » est la valeur maximum.

Les embouchures subissant les plus fortes influences du blocage des écoulements par la mer sont L'Yères (moyenne de 37 cm) et La Bresle (moyenne de 25 cm). La Touques et Le Dun ne subiraient alors que des variations de 5 cm (La Touques) et 4 cm (Le Dun). Cependant, ces valeurs ne peuvent être utilisées sans prendre en considération le contexte des modèles de régression. Ainsi, la lame d'eau excédentaire de 5 cm a été calculée à 13 km de distance à la mer (11 km à vol d'oiseau) alors que Le Dun (4 cm) a été calculé à seulement 3,8 km de distance à la mer. De même, la station de L'Yères se trouve à moins de quatre kilomètres de distance de l'exutoire, et dans un milieu sans énormément de contraintes hydrauliques, alors que la station sur La Bresle se situe à 5,7 km et comprend un réseau hydraulique complexe à Mers-les-Bains et au Tréport (à l'exutoire).

Les valeurs de lame d'eau excédentaires sont également à relativiser en fonction de la lame d'eau moyenne à l'embouchure des bassins. Il paraît assez logique de trouver des valeurs de lame d'eau excédentaire relativement basse (4 cm) pour Le Dun quand la valeur moyenne de la lame d'eau est d'environ 62 cm alors que sur La Touques la lame d'eau moyenne est d'environ 1,14 m. La section 4.4 aborde plus en détail ces aspects à l'échelle des embouchures et des événements de tempête.

Systématiquement pour chacune des embouchures, les valeurs maximales de lame d'eau excédentaire ont été atteintes durant des tempêtes majeures ou mineures. Sur *La Touques,* les valeurs maximales de lame d'eau excédentaire ont été atteintes durant la tempête Egon le 12 janvier 2017 (tempête majeure). Sur *Le Dun,* les maximales sont survenues le 2 mars 2014 (tempête mineure). Sur *L'Yères*, les maximales ont été atteintes le 22 novembre 1984 (tempête mineure). Sur *La Bresle,* les maximales ont été atteintes le 8 février 2016 (tempête mineure). Pour rappel, les informations de données de hauteurs d'eau observées en mer sont indisponibles pour les tempêtes du 26 février 1990 et du 25 décembre 1999 et le paramétrage du modèle de régression exclue une ligne entière de données si une information est manquante. Ces deux situations de tempête sont pourtant concomitantes aux plus hautes lames d'eau observées dans les bassins du Dun, de L'Yères et de La Bresle.

4.4. Analyse des effets de blocage des écoulements par la mer et élaboration d'un indice de concomitance ICH

Les résultats obtenus à partir des modèles RLM (type « _2 ») sont intéressants, mais on aimerait pouvoir aller plus loin et pouvoir comparer puis hiérarchiser les résultats pour chacune des embouchures et pour les différentes tempêtes. L'intérêt serait de pouvoir classer les tempêtes par rapport à la lame d'eau excédentaire aux embouchures des rivières, c'est-à-dire en fonction des effets de la concomitance sur chacun des bassins ou pour chacune des tempêtes. Pour se faire, l'idée est de proposer un indice, comme a pu le faire Météo France pour définir des indices

de sévérité des tempêtes selon la surface impactée (voir les fiches tempêtes de Météo France, Cerema, 2019). Ainsi, nous proposons un indice qui nécessite au préalable d'analyser les lames d'eau totales et les lames d'eau excédentaires engendrées par le blocage des écoulements par la mer sur les embouchures.

Cette mise en indice a été produite à partir de la lame d'eau excédentaire et calculée grâce à la méthode RCF présentée dans le chapitre 3. Nous avons appelé cet indice **ICH (Indice de concomitance hydrologique)**.

Ainsi, la section 4.4.1 est l'analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires engendrées par le blocage des écoulements par la mer sur les embouchures de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle à partir des histogrammes de fréquences et la section 4.4.2 présente leur mise en indice. Cet indice doit servir à mieux identifier les événements responsables de forts effets de concomitance dans les embouchures étudiées. La section 4.4.3 présente la synthèse des principaux résultats liés aux analyses sur les concomitances hydrologiques.

4.4.1. Analyse des lames d'eau excédentaires pour les modèles de type « _2 »

On considère dans l'analyse des effets de blocage des écoulements pour des situations propices à des effets de concomitance :

(1) La lame d'eau excédentaire du cours d'eau engendrée par un effet de blocage des écoulements par la mer (pour de fortes hauteurs d'eau en mer selon les conditions marines) ;

(2) Le rapport entre la lame d'eau excédentaire calculée et la lame d'eau totale de la rivière observée à la station hydrologique pour un événement donné et pour chacune des embouchures.

Les valeurs des lames d'eau totales observées (LE totales observées) et les lames d'eau excédentaires calculées (LE excédentaires) correspondent à des valeurs moyennes calculées sur les périodes : La Touques (1984 – 2019), Le Dun (2001 – 2019), L'Yères (1984 – 2019) et La Bresle (2001 – 2019).

Sur *La Touques*, **la lame d'eau excédentaire est de 4,7 cm** pour une lame d'eau totale observée de 113,7 cm (Figure 4.44). Ces 4,7 cm de lame d'eau excédentaire contribuent à 7 % de la réponse globale de la rivière à son embouchure. Sur les 1 910 lignes de données retenues, *les classes modales* comprennent :

- 50 % des valeurs de lame d'eau excédentaire comprises entre 4,1 cm et 5,3 cm ;
- Et 66 % des données intégrées contribuent entre 0,8 % et 7,7 % de la lame d'eau totale observée.

Les *valeurs maximales* de lame d'eau excédentaire calculée sont comprises entre 7,7 cm et 8,9 cm (> 1 % des données) et le blocage des écoulements par la mer a été au maximum entre 28,6 % et 35,5 % de la lame d'eau excédentaire.

Pour rappel, la station hydrologique est située à 13 km en amont de l'exutoire ce qui explique cette valeur assez faible de lame d'eau excédentaire.

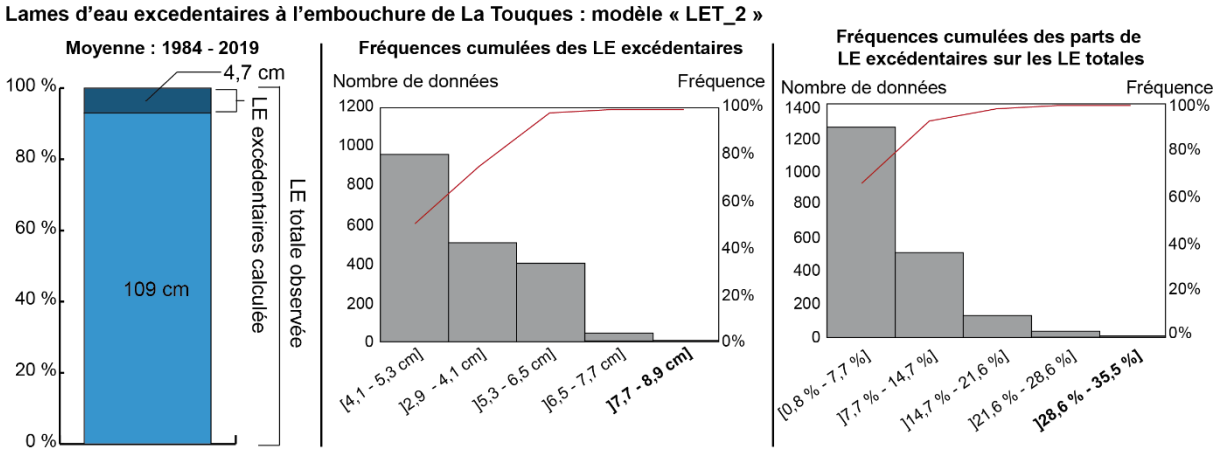


Figure 4.44 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure de La Touques

Sur *Le Dun*, **la lame d'eau excédentaire est de 3,8 cm** pour une lame d'eau totale observée de 62,8 cm (Figure 4.45). Ces 3,8 cm de lame d'eau excédentaire contribuent à 15 % de la réponse globale de la rivière à son embouchure. Sur les 567 lignes de données retenues, *les classes modales* comprennent :

- 70 % des valeurs de lame d'eau excédentaire comprises entre 3,4 cm et 4,4 cm ;
- Et 70 % des données intégrées contribuent entre 1,5 % et 19,5 % de la lame d'eau totale observée.

Les *valeurs maximales* de lame d'eau excédentaire calculées sont comprises entre 4,4 cm et 4,8 cm (3 % des données) et le blocage des écoulements par la mer a engendré au maximum entre 37,4 % et 46,4 % de la lame d'eau excédentaire.

Dans ce cas, pour une station hydrologique située à seulement 3,8 km de l'exutoire, la valeur de la lame d'eau excédentaire est très faible (3,8 cm).

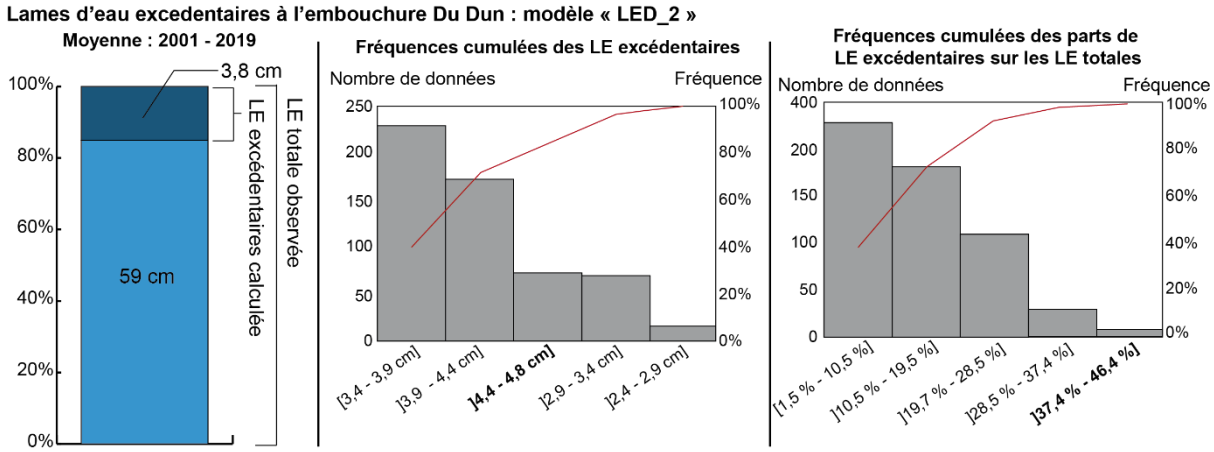


Figure 4.45 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure du Dun

Sur *L'Yères*, et pour une station hydrologique située à seulement 3,9 km de l'exutoire, **la lame d'eau excédentaire est de 36,9 cm** pour une lame d'eau totale observée de 112,9 cm (Figure 4.46). Ces 36,9 cm de lame d'eau excédentaire contribuent à 33 % de la réponse globale de la

rivière à son embouchure. Sur les 1 471 lignes de données retenues, *les classes modales* comprennent :

- 48 % des valeurs de lame d'eau excédentaire comprises entre 35,3 cm et 38 cm ;
- Et 40 % des données intégrées contribuent entre 29,8 % et 34,1 % de la lame d'eau totale observée.

Les *valeurs maximales* de lame d'eau excédentaire calculée sont comprises entre 40,7 cm et 43,5 cm (5 % des données) et le blocage des écoulements par la mer a engendré au maximum entre 38,4 % et 42,7 % de la lame d'eau excédentaire.

Cette contribution plus importante de la lame d'eau excédentaire (36,9 cm) par rapport à la lame d'eau totale observée pourrait être liée, d'une part à l'orientation de la vallée par rapport aux courants de marée et aux vagues (Figure 4.48- vallée n°3) et d'autre part de la présence de deux conduits à l'embouchure de L'Yères (digue de protection à la mer) pouvant bloquer plus facilement les écoulements (Costa, 1997 ; Letortu, 2013 ; Letortu *et al.*, 2019). Les ouvrages de protection et de contrôle des flux hydrauliques sont présentés plus précisément dans le chapitre 5.

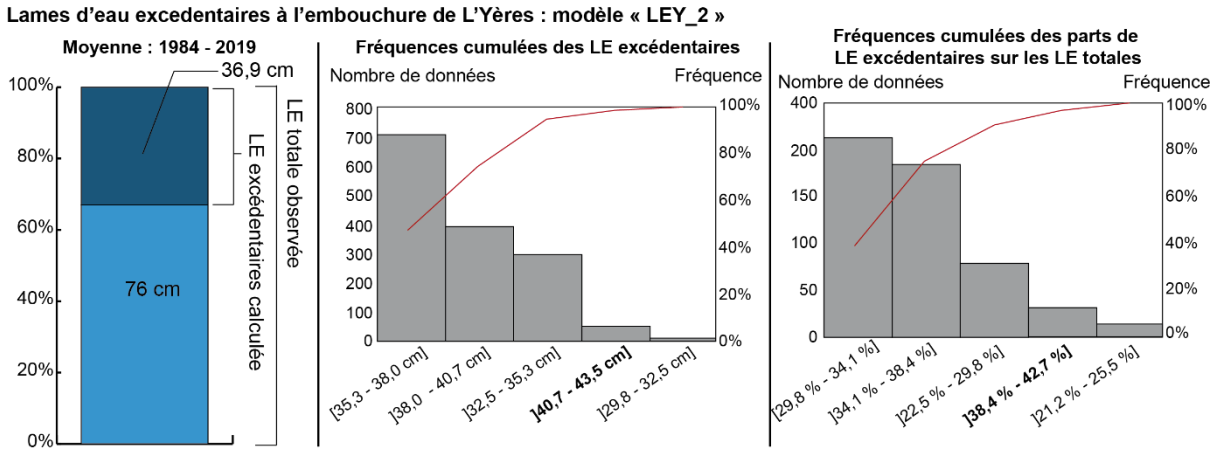


Figure 4.46 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure de L'Yères

Sur La Bresle, **la lame d'eau excédentaire est de 24,9 cm** pour une lame d'eau totale observée de 66,9 cm (Figure 4.47). Ces 24,9 cm de lame d'eau excédentaire contribuent à 39 % de la réponse globale de la rivière à son embouchure. Sur les 698 lignes de données retenues, *les classes modales* comprennent :

- 95 % ont des valeurs de lame d'eau excédentaire comprises entre 21,6 cm et 27,8 cm.
- Et 76 % des données intégrées contribuent entre 27,7 % et 49,8 % de la lame d'eau totale observée.

Les *valeurs maximales* de lame d'eau excédentaire calculée sont comprises entre 27,8 cm et 30,9 cm (4 % des données) et le blocage des écoulements par la mer a engendré au maximum entre 60,8 % à 71,9 % de la lame d'eau excédentaire.

Pour une station hydrologique située à 5,7 km de l'exutoire, les lames d'eau excédentaires (24,9 cm) par rapport à la lame d'eau totale observée (66,9 cm) pourraient être liées en partie à l'orientation de la vallée par rapport aux courants de marée et aux vagues (Figure 4.28- cas

n°3) (similaire à L'Yères) et également à la présence d'un clapet pouvant priver temporairement La Bresle d'un exutoire (DDTM, 2018).

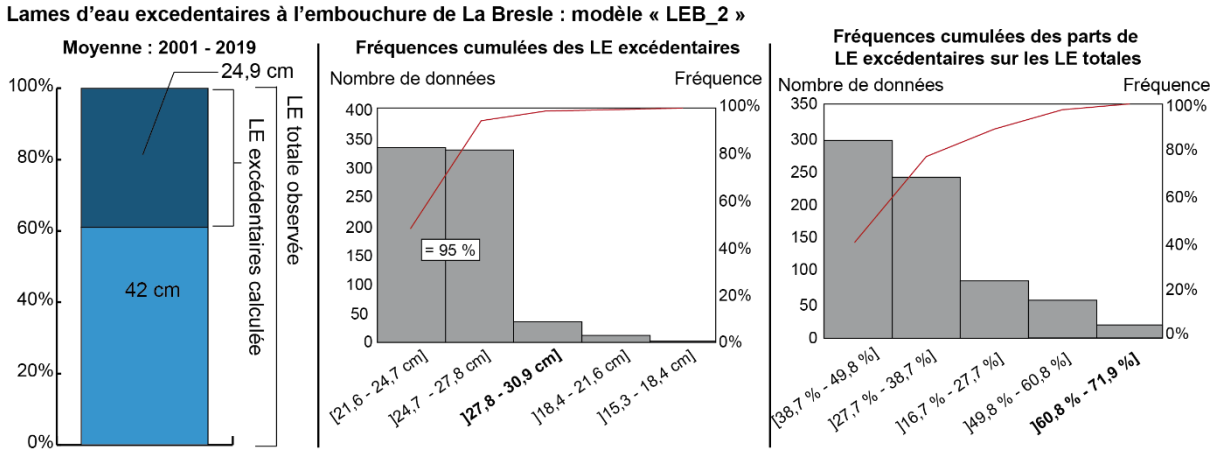


Figure 4.47 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure de La Bresle

Pour les quatre embouchures, les lames d'eau excédentaires moyennes calculées varient entre 4,7 cm et 36,9 cm pour des lames d'eau totales variant d'environ 63 cm à 113 cm (Tableau 4.16). Mais les contributions (rapport entre lame d'eau excédentaire et lame d'eau totale) sont fortement différentes puisqu'elles varient de 7 % à 39 % selon les embouchures. De même, le blocage des écoulements par la mer a engendré au maximum entre 29 et 72 % de la lame d'eau excédentaire.

Tableau 4.16. Synthèse des lames d'eau (LE), des lames d'eau excédentaires (LE exc.) et de la contribution de la lame d'eau excédentaire sur la lame d'eau totale pour les modèles de type « _2 »

			Lame d'eau excédentaire			Contribution de la lame d'eau excédentaire	
Embouchure	*D. à la mer (km)*[1]	*LE totale (cm)*	*Moyenne (cm)*	*Date LE exc. Maximale*	*Maximale (cm)*	*Moyenne (%)*	*Maximale (%)*
La Touques	***13,0***	113,7	4,7	12/01/2017 (tempête Egon)	8,9	7%	29 - 36%
Le Dun	*3,8*	62,8	3,8	02/03/2014 (T. mineure)	4,8	15%	37 - 46%
L'Yères	*3,9*	112,9	36,9	22/11/1984 (T. mineure)	43,5	33%	38 - 43%
La Bresle	*5,7*	66,9	24,9	08/02/2016 (T. mineure)	30,9	39%	61 - 72%

« D. à la mer » signifie distance à la mer et « T. » signifie tempête.

Actuellement, nous ne pouvons émettre que des hypothèses pour expliquer les différences de lame d'eau excédentaire et la contribution de ces lames d'eau excédentaire sur les lames d'eau totales.

La **première hypothèse** que nous pouvons émettre pour expliquer les différences entre ces bassins vient naturellement de la **distance** par rapport à l'exutoire **des stations hydrologiques disponibles**, dont les données ont été utilisées pour élaborer les modèles de régression (Figure 4.48). Il sera logique que plus la distance de la station hydrologique par rapport à l'exutoire sera grande, moins la lame d'eau excédentaire engendrée par un effet de blocage des écoulements soit importante (effet d'atténuation avec la distance). Cependant, il

est difficile de savoir dans quelle mesure la lame d'eau excédentaire augmente selon son rapprochement à la mer (de façon exponentielle, linéaire, logarithmique, etc.).

La **deuxième hypothèse,** qui a en partie été évoquée dans la littérature, vient de **l'orientation des embouchures** par rapport aux courants de marée et aux vagues (Costa, 1997 ; Letortu, 2013 ; Letortu *et al.*, 2019). Ces études ont montré que si l'embouchure d'une vallée est orientée dans le sens opposé des vagues et des courants de marée, alors les phénomènes de submersion marine seront beaucoup plus importants que si le courant et les vagues ne font que suivre la côte. Nous pouvons donc supposer que plus les embouchures sont propices à de forts effets de submersion marine, plus ces mêmes embouchures sont propices à de forts effets de blocage des écoulements par la mer.

La **troisième hypothèse** que nous pouvons émettre vient des **aménagements hydrauliques** présents le long des embouchures et à l'exutoire des bassins (ces éléments sont détaillés plus précisément dans le chapitre 5). Pour chacune des embouchures, les modes de gestion des flux marins et continentaux sont très différents. Pour exemple, les ports de Dieppe (L'Arques) et de Deauville (La Touques) sont munis de brises vagues et font l'objet d'une forte urbanisation alors que Criel-sur-Mer (L'Yères) ne possède qu'une digue de protection et un espace partiellement non urbanisé dans son embouchure (parcelles du conservatoire du littoral). Ainsi des aménagements comme les clapets de régulation des flux (installés à Dieppe et au Tréport), vont se fermer lorsqu'un seuil de niveau d'eau en mer est atteint. La fermeture (temporaire) de ce clapet entraîne un blocage des écoulements étant donné que le bassin est temporairement privé d'un exutoire.

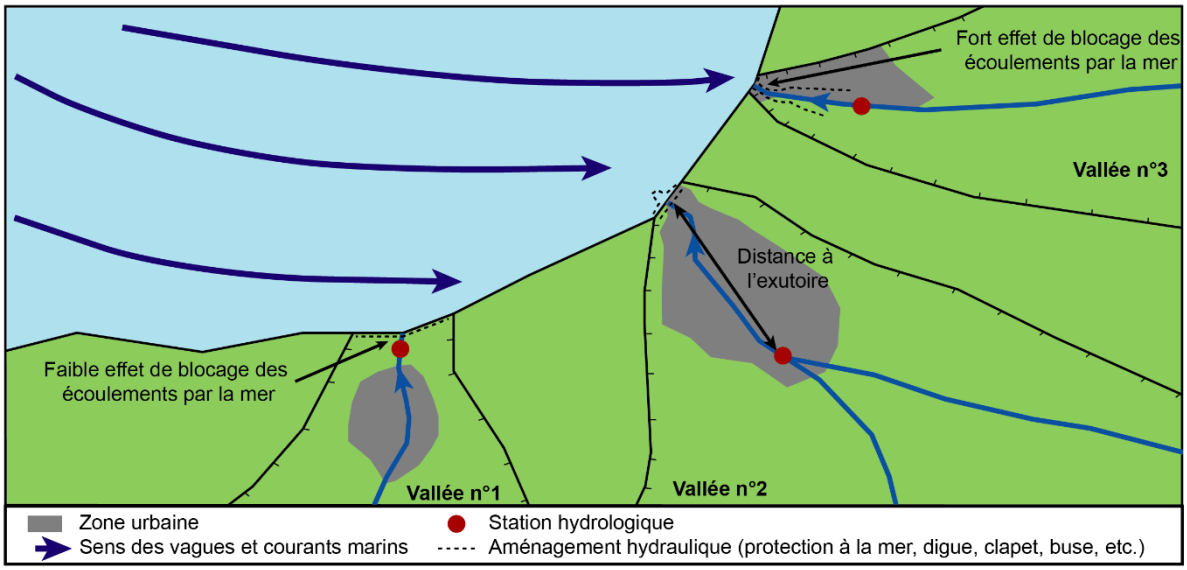


Figure 4.48 : Influence des submersions marines dans les embouchures

Les valeurs de lames d'eau excédentaires ainsi présentées permettent une première analyse des effets de blocage des écoulements au niveau des embouchures avec des valeurs absolues. Ces valeurs doivent maintenant être relativisées pour pouvoir mieux comparer ces effets de blocage entre les bassins et pour les différentes tempêtes majeures. Pour cela, nous avons choisi de transformer les valeurs de lame d'eau excédentaire (cm) en un indice de concomitance hydrologique (ICH). L'intérêt de cet indice est de pouvoir dire si telle valeur de lame d'eau excédentaire (e.g. 8 cm sur La Touques) est finalement une valeur forte ou une valeur faible par rapport à d'autres événements ou d'autres bassins.

4.4.2. Mise en indices des lames d'eau excédentaires

Les valeurs de la lame d'eau excédentaire, ainsi que la contribution des hauteurs d'eau en mer (liées aux conditions marines) sur la lame d'eau totale observée ont été transformées sous forme d'indice, dans un souci de comparaison et de hiérarchisation des lames d'eau excédentaires calculé à l'embouchure des différentes rivières littorales, grâce à la méthode RCF (*Relative Cumulative Frequency*) [13].

$$[13] \quad RCF = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - X_{min}}$$

L'indice ICH correspond au rapport de la différence entre la lame d'eau excédentaire à une date donnée (x_i) et la lame d'eau excédentaire minimum calculée par le modèle de régression (x_{min}) sur la différence entre la lame d'eau excédentaire maximum (x_{max}) et minimum (x_{min}). Cet indice est d'abord appliqué sur l'ensemble des chroniques de chacune des quatre embouchures (ICHa, Figure 4.49 et Tableau 4.19-A), puis sur les seules huit tempêtes majeures identifiées (ICHb, Tableau 4.19-B).

4.4.2.1. Classement des embouchures selon l'indice ICH

L'analyse des indices ICHa calculés sur les embouchures permet d'abord de vérifier que les résultats obtenus vont permettre de retrouver la même hiérarchie que celle obtenue dans l'analyse portant sur les lames d'eau excédentaires (section 4.4.1) (Tableau 4.17).

Tableau 4.17. Classement des embouchures selon l'indice ICHa (valeurs moyennes sur toutes les données)

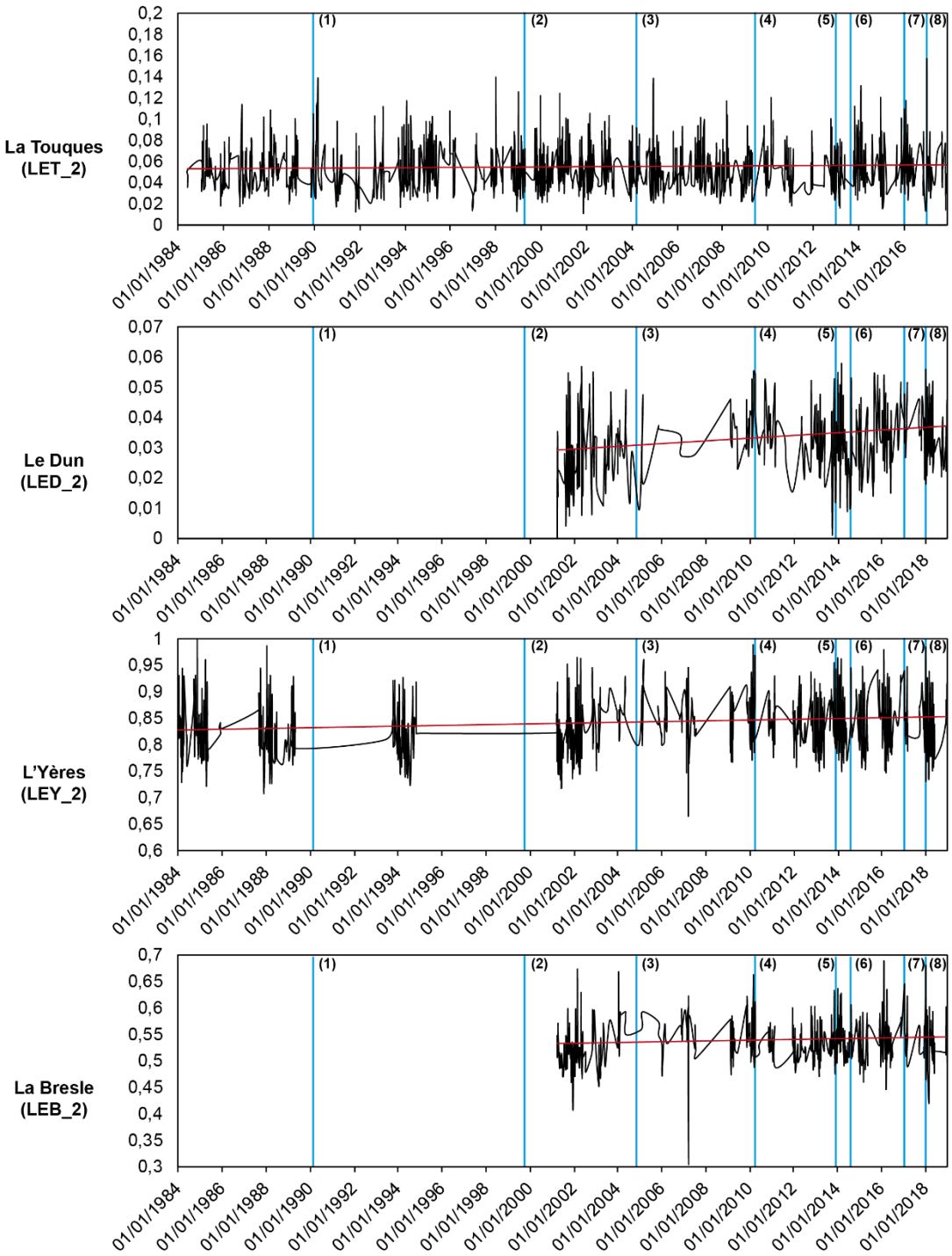
Rang	*Embouchure*	*ICHa*	*Lame d'eau excédentaire moyenne (cm)*	*Contribution moyenne (%)*
1	L'Yères	0,51, ± 0,10	36,9	33
2	La Bresle	0,34, ± 0,10	24,9	39
3	La Touques	0,06, ± 0,14	4,7	7
4	Le Dun	0,04, ± 0,18	3,8	15

Cette vérification étant faite, les indices ont été ensuite calculés sur les lames d'eau excédentaires durant huit tempêtes majeures survenues en Manche (*i.e.* Eleanor, Egon, Qumaira, Dirk, Xynthia, Dagmar, Lothar et Viviane et Wiebkle).

Les **indices moyens** (ICHb – moyenne des huit tempêtes) calculés pour chacune des embouchures permettent de mettre en évidence **le rôle des conditions marines extrêmes sur la réponse des lames d'eau des rivières** (Tableau 4.18).

Tableau 4.18. Classement des embouchures selon l'indice ICHb (valeurs moyennes sur les tempêtes majeures)

Rang	*Embouchure*	*ICHb*	*Lame d'eau excédentaire moyenne (cm)*	*Contribution moyenne (%)*
1	L'Yères	0,90	37,9	40
2	La Bresle	0,60	28,2	41
3	La Touques	0,11	7,5	18
4	Le Dun	0,04,	4,0	19



(1) Tempêtes Viviane et Wiebke le 27 février 1990 ; (2) Tempête Lothar le 26 décembre 1999 ; (3) Tempête Dagmar le 17 décembre 2004 ; (4) Tempête Xynthia le 28 février 2010 ; (5) Tempête Dirk le 22 décembre 2013 ; (7) Tempête Qumaira le 1er février 2014 ; Tempête Egon le 12 janvier 2017 ; (8) Tempête Eleanor le 3 janvier 2018.

Figure 4.49 : Indice de concomitance hydrologique (ICH) et date des tempêtes majeures en Manche

L'analyse de la « sensibilité » des embouchures aux effets de blocage des écoulements, en considérant la **moyenne des chroniques (ICHa)** et la **moyenne des situations de tempêtes majeures (ICHb),** permet de mieux mettre en évidence le rôle des tempêtes sur chacune des embouchures (Tableau 4.19).

Tableau 4.19. Analyse et classement des embouchures selon les indices ICHa et ICHb calculés pour chacune des embouchures sur l'ensemble de la chronique (a) et pour huit tempêtes majeures (B)

	La Touques			Le Dun			L'Yères			La Bresle		
	Rang	*ICH*	*LE exc. (cm)*	*Rang*	*ICH*	*LE exc. (cm)*	*Rang*	*ICH*	*LE exc. (cm)*	*Rang*	*ICH*	*LE exc. (cm)*
ICHa*	3	0,06	4,7	4	0,04	3,8	1	0,51	36,9	2	0,34	24,9
ICHb**	3	0,11	7,5	4	0,04	4,0	1	0,90	37,9	2	0,60	28,2

ICHa* : Moyenne des indices de concomitance hydrologique sur l'ensemble des chroniques et des embouchures ; ICHb** : Moyenne des indices de concomitance hydrologique pour les huit tempêtes majeures identifiées sur l'ensemble des embouchures

Les embouchures de L'Yères et de La Bresle semblent donc être les plus propices aux effets de blocage des écoulements par la mer en considérant l'ensemble des chroniques (ICHa), mais également en considérant exclusivement les tempêtes majeures (ICHb). Pour trois des quatre embouchures (La Touques, L'Yères et La Bresle), la lame d'eau excédentaire engendrée par un **effet de blocage des écoulements** serait alors **deux fois plus importante durant les situations de tempêtes majeures** que durant la moyenne des chroniques de la situation hydrodynamique n°2. Ceci n'est cependant pas valable pour l'embouchure du Dun qui subit finalement de faibles variations de la lame d'eau.

Afin d'affiner un peu plus les analyses des événements de tempêtes, nous présentons dans la suite de cette section le détail des indices ICHb pour chacune des huit tempêtes majeures et en analysant plus en détail leurs caractéristiques météo-marines. Nous utiliserons donc le terme ICH pour décrire la valeur d'indice de ces tempêtes.

4.4.2.2. Classement des tempêtes majeures (1984 – 2019) selon l'indice ICH

Si maintenant on s'intéresse, non plus aux valeurs des indices moyens par bassin (ICHa), mais aux indices calculés, chacune des huit tempêtes majeures (Tableau 4.20) n'a pas les mêmes incidences selon les bassins.

À l'embouchure de La Touques, la tempête la plus marquante en termes de blocage des écoulements par la mer est la tempête Egon, mais dans un contexte où la lame d'eau totale était seulement de 28 cm n'ayant pas eu de réelle incidence dans la vallée. Cependant, pour cette même embouchure, la tempête Eleanor coïncide avec une lame d'eau ayant atteint 2,47 m. Cette même tempête semble avoir également eu d'importants effets de blocage des écoulements sur les embouchures du Dun, de L'Yères et de La Bresle, mais ne correspond pas à la tempête ayant engendré les plus hautes lames d'eau dans ces embouchures.

Les différents rapports d'études mentionnent plutôt que les plus hautes lames d'eau observées dans les embouchures se sont produites durant la tempête Lothar et Martin le 26 décembre 1999. Durant cette tempête de 1999, les lames d'eau ont atteint, pour la plupart, plus d'un mètre alors que les lames d'eau, dans un état normal, vont varier entre 0,2 m (Le Dun) et 0,6 m (L'Yères).

Tableau 4.20. Indices de concomitances ICHb durant les huit tempêtes majeures survenues entre le 27 février 1990 et le 3 janvier 2018

La Touques			Le Dun			L'Yères			La Bresle		
Tempête majeure	***LE exc. (cm)***	***ICH***	***Tempête majeure***	***LE exc. (cm)***	***ICH***	***Tempête majeure***	***LE exc. (cm)***	***ICH***	***Tempête majeure***	***LE exc. (cm)***	***ICH***
Egon (12/01/2017)	8,9	0,16	Eleanor (03/01/2018)	4,6	0,05	Eleanor (03/01/2018)	42,9	0,99	Eleanor (03/01/2018)	30,7	0,68
Dagmar (17/12/2004)	8,2	0,14	Xynthia (28/02/2010)	4,6	0,05	Xynthia (28/02/2010)	42,5	0,98	Xynthia (28/02/2010)	30,0	0,66
Eleanor (03/01/2018)	8,1	0,14	Qumaira (01/02/2014)	4,2	0,04	Egon (12/01/2017)	40,4	0,94	Egon (12/01/2017)	29,1	0,64
Xynthia (28/02/2010)	8,1	0,12	Egon (12/01/2017)	4,1	0,04	Qumaira (01/02/2014)	39,2	0,93	Qumaira (01/02/2014)	27,3	0,59
Qumaira (01/02/2014)	7,5	0,09	Dirk (22/12/2013)	3,8	0,03	Dagmar (17/12/2004)	38,2	0,80	Dagmar (17/12/2004)	26,3	0,56
Lothar (26/12/1999)	7,4	0,08	Dagmar (17/12/2004)	2,8	0,01	Dirk (22/12/2013)	37,6	0,79	Dirk (22/12/2013)	25,6	0,50
Viviane et Wiebke (27/02/1990)	6,1	0,07	Lothar (26/12/1999)	ND.	ND.	Lothar (26/12/1999)	ND.	ND.	Lothar (26/12/1999)	ND.	ND.
Dirk (22/12/2013)	5,1	0,05	Viviane et Wiebke (27/02/1990)	ND.	ND.	Viviane et Wiebke (27/02/1990)	ND.	ND.	Viviane et Wiebke (27/02/1990)	ND.	ND.
Moyenne (ICHb)	**7,5**	**0,11**	**Moyenne (ICHb)**	**4,0**	**0,04**	**Moyenne (ICHb)**	**37,9**	**0,90**	**Moyenne (ICHb)**	**28,2**	**0,60**

LE exc : Lame d'eau excédentaire (effet de blocage des écoulements par la mer), ICH : Indice de concomitance hydrologique, ND : Non documenté

Ainsi, il est possible de classer, de façon globale, ces tempêtes en fonction de leurs conséquences sur l'effet de blocage des écoulements par la mer (lame d'eau excédentaire) (Tableau 4.21).

Tableau 4.21. Classement des tempêtes majeures survenues sur les quatre embouchures selon l'indice ICH

Rang	*Tempête*	*ICH*	*Lame d'eau excédentaire moyenne (cm)*
1	Eleanor	0,05 – 0,99	4,6 – 42,9
2	Xynthia	0,05 – 0,98	4,6 – 42,5
3	Egon	0,04 – 0,94	4,1 – 39,2
4	Qumaira	0,04 – 0,93,	4,2 – 40,4
5	Dagmar	0,01 – 0,80	2,8 – 35,3
6	Dirk	0,03 – 0,50	3,8 – 37,6
7	Lothar	0,08	7,4
8	Viviane et Wiebke	0,07	6,1

Il est difficile de se prononcer sur le réel rang des tempêtes Lothar, ainsi que Viviane et Wiebke, en raison d'un manque de données sur les mesures de hauteur d'eau observée en mer à l'embouchure du Dun, de L'Yères et de La Bresle.

4.4.2.3. Apport des indices ICH dans la compréhension des tempêtes majeures et de leurs effets dans les embouchures littorales

La dernière étape de cette analyse sur les effets de blocage des écoulements par la mer consiste à resituer les indices calculés pour les tempêtes majeures (ICH) en fonction des conditions météo-marines de ces événements. Nous avons également voulu comparer l'indice ICH avec l'indice de sévérité des tempêtes utilisé par Météo France (Cerema, 2019) pour voir les potentiels apports d'un indice de blocage des écoulements dans la compréhension des tempêtes majeures. Actuellement l'indice de sévérité de Météo France est établi en fonction de la superficie de territoire touché durant une tempête alors que nous nous proposons un indice en fonction de l'importance du blocage des écoulements par la mer.

En comparant les indices ICH et indices de sévérités de Météo France (Tableau 4.22), nous pouvons voir que les tempêtes ayant engendrés les plus importants effets de blocage des écoulements ne coïncident pas aux plus grandes tempêtes majeures définies selon Météo France. Nous pouvons interpréter la différence entre l'indice ICH et l'indice de sévérité par le fait que le blocage des écoulements par la mer est lié à des phénomènes locaux intervenant à l'échelle de La Manche (que nous pouvons supposer comme la direction des houles, hauteurs d'eau en mer, etc.). Il faut donc que certaines conditions météo-marines soient remplies pour qu'un blocage des écoulements puisse s'opérer.

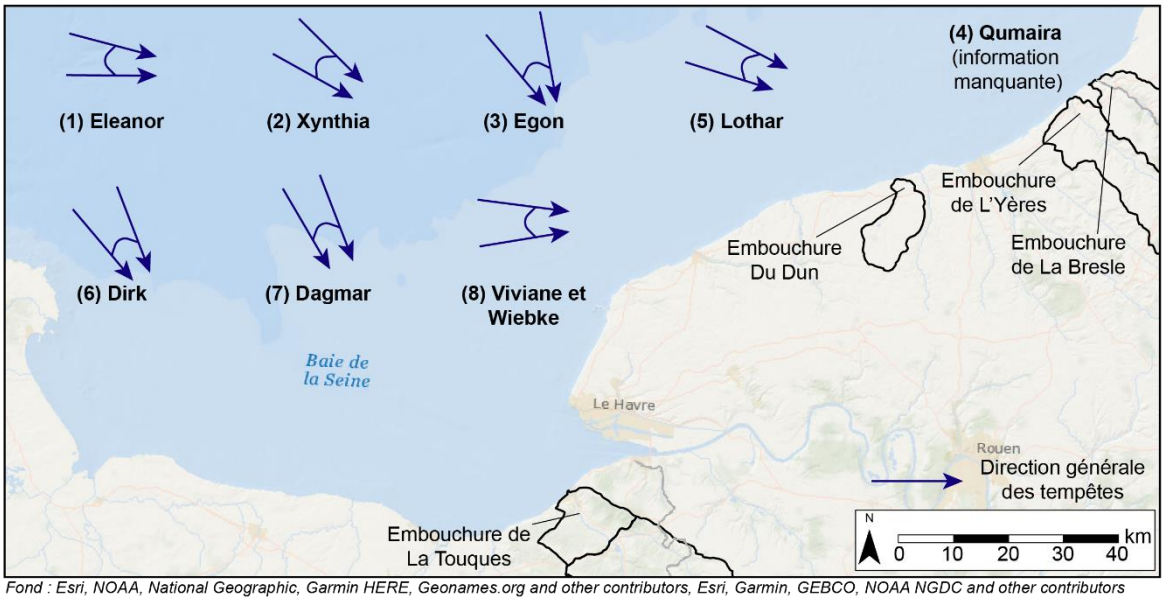
Tableau 4.22. Comparaison des tempêtes majeures selon les indices ICH et l'indice de sévérité de Météo France (Cerema, 2019) et caractéristiques météo-marines des tempêtes majeures

Rang	*Tempête majeure*	*ICH*	*Indice Météo France*	*Pression atm. (hPa)*	*Force vent (km/h)*	*Direction des vents (°)*	*Coefficient de marée*	*HE m Le Havre (m ZH)*	*HE m Dieppe (m ZH)*
1	Eleanor (03/01/2018)	0,05 – 0,99	Fort (27 %)	969	120 - 140	270 - 290	107	8,70	9,76
2	Xynthia (28/02/2010)	0,05 - 0,98	Exceptionnel (49 %)	975	100 - 130	300 - 315	108	8,42	9,56
3	Egon (12/01/2017)	0,04 - 0,94	Non référencé	982	120 - 130	320 - 350	99	8,31	9,41
4	Qumaira (01/02/2014)	0,04 - 0,93	Non référencé	Non référencé	135 - 145	Non référencé	113	8,63	9,93
5	Dagmar (17/12/2004)	0,01 - 0,80	Fort (18 %)	990	120 - 140	330 - 340	78	7,63	8,6
6	Dirk (22/12/2013)	0,03 - 0,50	Fort (15 %)	985	100 - 110	320 - 340	71	7,68	8,52
7	Lothar (26/12/1999)	0,08	Exceptionnel (56 %)	960	110 - 119	290 - 300	100	8,28 (prédit)	9,47 (prédit)
8	Viviane et Wiebke (27/02/1990)	0,07	Exceptionnel (52 %)	985	100 - 110	270 - 280	106	8,59 (prédit)	9,63 (prédit)

« Pression atm. » signifie pression atmosphérique, HE m signifie hauteur d'eau observée en mer.

Le classement établi montre que, dans l'ensemble et assez logiquement, plus les pressions atmosphériques sont basses, conjointes à d'importants coefficients de marée ainsi qu'à des hauteurs d'eau en mer élevées, plus l'indice ICH est fort. Bien qu'il soit encore difficile de comprendre dans quelle proportion la direction des tempêtes, des vagues, des coefficients de marée, etc. influencent le blocage des écoulements, il semblerait que les tempêtes ayant une direction générale comprise entre 270° et environ 320° soient plus propices à engendrer d'importants blocages des écoulements par la mer dans les embouchures des vallées littorales normandes (Figure 4.50).

Rappelons que l'indice des tempêtes Lothar, Viviane et Wiebke les données de hauteurs d'eau observées en mer sont indisponibles. Par conséquent, les modèles de régression n'ont pas tenu compte de ces tempêtes (avec une absence de données également sur les lames d'eau et débit pour Le Dun et La Bresle). Or, des études mentionnent que les hauteurs d'eau auraient dépassé les 10 m ZH avec des surcotes dépassant le mètre (Turki *et al.*, 2015 ; Letortu *et al.*, 2019). Ainsi, l'indice ICH sous-estime très probablement l'effet de blocage des écoulements par la mer durant ces deux tempêtes.



Fond : Esri, NOAA, National Geographic, Garmin HERE, Geonames.org and other contributors, Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC and other contributors

Figure 4.50 : Direction générale des tempêtes majeures en Manche de 1984 à 2018

Au regard des caractéristiques météo-marines des tempêtes majeures, on peut supposer que ces effets de blocage risquent de devenir de plus en plus fréquents et, peut être, plus importants avec + 1 m d'élévation du niveau marin en Manche à l'horizon 2100. Ainsi des situations qui sont actuellement exceptionnelles, comme la tempête Eleanor, Xynthia ou Lothar, peuvent devenir des situations plus fréquentes à l'avenir posant maintenant la question sur le devenir des stations balnéaires et des zones urbaines localisées dans les fonds et à l'embouchure des vallées littorales.

4.4.3. Synthèse des principaux résultats

Les analyses statistiques ont permis de mettre en évidence le rôle des conditions marines sur les embouchures des vallées littorales grâce à des modèles de régression. Une analyse de l'ensemble des chroniques, sans distinction (situation hydrodynamique « _1 »), ne permet cependant pas cette mise en évidence des conditions marines et nous avons dû déterminer différentes situations hydrodynamiques afin de trouver le meilleur équilibre entre la meilleure explication des variables marines et le moins d'erreurs dans les modèles de régression. La situation hydrodynamique n°2, déterminée à partir d'une analyse multifactorielle, regroupent des conditions hydrologiques et marines propices à un blocage des écoulements par la mer. En ne retenant que des dates où des débordements de cours d'eau se sont produits (situation hydrodynamique « _3 »), les réponses des lames d'eau aux variables marines sont plus fortes, mais les erreurs engendrées par le modèle sont également plus importantes et n'ont pu être retenues dans l'analyse finale des effets de blocage des écoulements.

En partant d'une situation propice à un blocage des écoulements par la mer (situation hydrodynamique « _2 »), nous avons pu isoler la lame d'eau engendrée exclusivement par les

variables marines (hauteur d'eau en mer observée, prédite, surcote, etc.) grâce aux modèles de régression. Cette lame d'eau, issue d'un blocage des écoulements par la mer, a été appelée lame d'eau excédentaire. L'analyse de cette lame d'eau excédentaire a montré que les embouchures ne réagissent pas toutes de la même façon à un blocage des écoulements par la mer. Sur la base de quatre embouchures (La Touques, Le Dun, L'Yères et La Bresle), nous avons pu voir que les lames d'eau excédentaires pouvaient varier de 4 cm (Le Dun) à 37 cm (L'Yères). Trois hypothèses ont pu être émises pour expliquer ces différences :

(1) La **première hypothèse** porte sur la **distance de la station hydrologique par rapport à la mer** qui engendre nécessairement des différences de lame d'eau excédentaire. Si dans l'idéal chaque station devait être située à une distance équivalente à la mer, dans les faits, la distance à la mer des stations disponibles variait de 3,8 km (Le Dun) à 13 km (La Touques). À l'heure actuelle, nous sommes dans l'impossibilité de comprendre le gradient de lames d'eau excédentaire pouvant exister depuis l'exutoire jusqu'aux stations hydrologiques ;

(2) La **deuxième hypothèse** porte sur **l'orientation des embouchures par rapport à la mer**. Il apparaît assez logiquement qu'une embouchure exposée pleinement au courant de marée et aux vagues réagira différemment d'une embouchure partiellement protégée de ces mêmes courants. Il est cependant difficile de comprendre localement qu'elles sont les variables ayant le plus d'impact dans le blocage de l'écoulement par la mer ;

(3) La **troisième hypothèse** porte sur la **présence d'aménagements hydrauliques** à l'embouchure des vallées littorales. Cette hypothèse est davantage développée dans le chapitre 5 de ce manuscrit. Les différents rapports d'études mentionnent cependant la présence d'un clapet de régulation à l'exutoire sur La Bresle ainsi que de conduits permettant aux flux de circuler jusqu'à ce qu'une certaine limite soit atteinte. Au-delà de cette limite, les lames d'eau sont piégées dans les embouchures.

À partir de ces premières analyses, nous avons voulu mettre en avant le rôle des tempêtes majeures sur les effets de blocage des écoulements par la mer. Pour trois des quatre bassins identifiés (La Touques, L'Yères et La Bresle), les lames d'eau excédentaires sont plus importantes en période de tempête avec une augmentation moyenne allant d'environ + 1 cm (L'Yères) à + 3,3 cm (La Bresle). Afin de mieux comprendre l'impact probable des tempêtes majeures, nous avons procédé à un classement de huit tempêtes majeures selon la lame d'eau excédentaire.

Ce classement et ces analyses ont donné lieu à la mise en place d'un indice de concomitance hydrologique (ICH) afin de pouvoir classer les différentes tempêtes et embouchures, mais également pour pouvoir comparer ces indices ICH par rapport à d'autres indices déjà mis en place comme les indices de sévérité élaborés par Météo France.

En analysant individuellement les tempêtes majeures, nous avons pu voir que les lames d'eau excédentaires variaient de 5,1 cm à 8,9 cm sur La Touques, de 2,8 cm à 4,6 cm sur Le Dun, de de 37,6 cm à 42,9 cm sur L'Yères et de 25,6 cm à 30,7 cm sur La Bresle. Il y a donc en moyenne entre 4 et 5 cm de différence entre les plus fortes et plus faibles tempêtes majeures toutes embouchures confondues. Ces différences entre les tempêtes majeures peuvent s'expliquer à travers les caractéristiques météo-marines de ces dernières.

Au regard des caractéristiques météorologiques, il apparaît que les tempêtes majeures ayant engendré les plus importantes lames d'eau excédentaires ont en moyenne eu une direction moyenne des vents comprise entre 270° et 320° et avec des pressions atmosphériques comprises entre 970 et 980 hPa. Au regard des caractéristiques marines, les tempêtes ayant engendré les plus importantes lames d'eau excédentaires avaient des coefficients de marée supérieurs à 100.

Encore aujourd'hui, les pics de tempête ont toujours été décalés par rapport aux pics de marée. Il devient alors important de se poser la question d'un blocage potentiellement majeur des écoulements par la mer en cas de coïncidence entre le pic de tempête et le pic de marée.

Pour terminer, il est important de rappeler que les modèles de régression mis en place expliquent à 43 % la lame d'eau (totale) du Dun, à 63 % la lame d'eau de La Touques, à 87 % la lame d'eau La Bresle et à 90 % la lame d'eau de L'Yères (Tableau 4.14). Bien que ces travaux apportent une première estimation des potentielles lames d'eau excédentaires, il nous manque encore certains éléments de réponse à la compréhension du fonctionnement d'embouchures comme Le Dun ou La Touques. Cependant cette méthode peut servir de base méthodologique à une analyse d'autres bassins littoraux voire à de grands bassins comme la Seine ou la Garonne où les interactions et les observations d'influence de la mer sur le cours d'eau sont fréquentes. Comme pour toutes analyses statistiques, cette méthodologie repose sur la condition qu'un certain nombre de données sont disponibles. Plus les sources d'informations seront nombreuses (stations hydrologiques, météorologiques, observatoires, etc.) plus la qualité des modèles de régression sera importante.

4.5.Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était de développer une méthodologie pour mieux comprendre les effets de concomitance entre les lames d'eau des embouchures et les effets de blocage par la mer durant les événements de tempête majeures. Pour cela, nous avons utilisé des modèles de régression linéaire multiples afin d'intégrer plusieurs variables et analyser la réponse de la lame d'eau des basses vallées en fonction de ces variables.

Au total, 13 variables ont ainsi été utilisées. Les données de débit et de lame d'eau ont pu être récupérées sur quatre embouchures : La Touques, Le Dun, L'Yères et La Bresle. Les variables débit de base et niveau piézométrique ont servi pour la détermination des conditions hydrologiques. Les stations de Caen, de Saint-Gatien-des-Bois et Dieppe ont été utilisées pour la détermination des conditions météorologiques grâce aux précipitations totales, aux précipitations et températures utilisées pour le calcul du bilan hydrique qui permet de déterminer l'état de saturation des sols. Les conditions marines ont été déterminées grâce aux marégraphes du Havre et de Dieppe et les données modélisées par le SHOM ont été utilisées au plus près des embouchures.

De premiers essais ont amené à « filtrer » les données des modèles de régression pour pouvoir faire ressortir la réponse des conditions marines sur la lame d'eau des bassins. Trois situations hydrodynamiques ont ainsi été déterminées : (1) toutes dates confondues, (2) en situation propice aux blocages des écoulements par la mer et (3) durant des inondations. Les résultats des modèles statistiques ont ainsi montré que le filtre n°2 (situation propice à des effets de blocage des écoulements par la mer) était le plus performant pour déterminer la contribution des conditions marines sur la lame d'eau avec les plus faibles marges d'erreur sur les modèles.

L'analyse des lames d'eau excédentaires, c'est-à-dire les lames engendrées par un effet de blocage des écoulements, a montré que d'une part, les bassins ne réagissaient pas tous de la même façon aux effets de blocage des écoulements et que d'autre part, les événements de tempêtes majeures ont tendance à augmenter la lame d'eau excédentaire dans les embouchures. Sur les quatre embouchures étudiées, L'Yères et La Bresle sont les plus impactés par les effets de blocage des écoulements. La Touques subit des variations assez notables pour une station hydrologique située à 13 km de l'exutoire. Finalement, Le Dun subit de relativement

faibles variations de lame d'eau excédentaire et semble peu affecté par le blocage des écoulements. Ces résultats sont cependant à nuancer, car nous n'avons pas pu intégrer la tempête Lothar (26 décembre 1999) ayant engendré les plus forts débordements de cours d'eau dans la plupart des embouchures de Seine-Maritime.

Afin d'apporter une plus grande justesse dans l'analyse des effets de blocage des écoulements par la mer, il serait nécessaire de mieux équiper les embouchures avec des stations hydrologiques situées au plus près des exutoires, avec des acquisitions **au pas horaire** pour une meilleure compréhension des décalages pouvant exister entre le début d'un événement de tempête majeure et la réponse de la lame d'eau des embouchures

De plus, l'acquisition des bases de données provenant de différentes sources, ainsi que leur harmonisation représente une des phases les plus longues de ce travail de recherche. Pour pouvoir exploiter cette méthode à d'autres bassins littoraux en France, il serait important de pouvoir disposer d'une plateforme commune de bancarisation des données hydrologiques, météorologiques et marines. Ce type de plateforme permettrait d'accélérer les recherches et l'application des analyses statistiques à de multiples embouchures littorales et d'avoir des bases de données communes permettant une plus juste comparaison des analyses statistiques.

L'analyse statistique seule des lames d'eau excédentaire ne suffit pas pour comprendre pleinement les effets de blocage des écoulements par la mer au sein des basses vallées littorales. Ces effets doivent être abordés plus en détail à travers une dimension spatiale que nous proposons grâce à une modélisation hydraulique des débordements de cours d'eau liés à des effets de concomitance avec la mer lors des tempêtes (chapitre 5). Les valeurs de lame d'eau excédentaire, déterminées dans cette analyse statistique, seront donc intégrées à la modélisation hydraulique afin de reproduire un débordement de cours avec et sans blocage des écoulements fluviaux par la mer durant une tempête.

Chapitre 5. Modélisation hydraulique des débordements de cours d'eau liés à des effets de concomitance avec la mer lors des tempêtes

Ce dernier chapitre analyse spatialement le comportement des débordements de cours d'eau concomitants à des épisodes de tempêtes majeures à travers une modélisation hydraulique assez simple sous HEC RAS. L'objectif est d'apporter des premiers éléments de réponse et ainsi que des premières estimations aux comportements des cours d'eau dans les basses vallées littorales de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle. Les deux événements de tempête concomitante aux plus hauts débordements de cours d'eau sont la tempête Eleanor (pour La Touques), les 3 et 4 janvier 2018, et la tempête Lothar et Martin les 26 et 27 décembre 1999.

La section 5.1 est l'introduction générale de ce chapitre. La section 5.2 présente les basses vallées et des données nécessaires à la modélisation hydraulique. La section 5.3 expose le modèle HEC RAS et le mode d'écoulement régulier utilisé. La section 5.4 détaille les résultats à l'échelle des basses vallées. La section 5.5 présente l'analyse transversale et la discussion des résultats de ce chapitre. Enfin, la section 5.6 conclut ce chapitre.

5.1. Introduction du chapitre

Les rivières littorales normandes, situées dans un contexte macrotidal sont propices aux effets de blocage des écoulements par la mer pouvant alors engendrer une lame d'eau excédentaire, c'est-à-dire une lame d'eau qui n'aurait pu exister sans ce blocage (*cf.* chapitre 4). Différentes hypothèses ont été émises sur ces effets de blocage pouvant être liés (1) aux conditions météo-marines (coefficients de marée, surcote, hauteur d'eau en mer, etc.), (2) à l'orientation des bassins aux courants de marée et aux vagues et (3) aux aménagements hydrauliques présents dans les basses vallées (Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2016). Une basse vallée se comprend comme un espace ouvert dans lequel la marée se fait ressentir (Baud *et al.*, 2018). Les basses vallées littorales sont délimitées, pour la plupart, soit par le Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre[1]) soit par les syndicats mixtes de bassin versant.

À partir des analyses statistiques réalisées dans le chapitre 4, notre objectif est maintenant de comprendre comment vont réagir les rivières à un blocage des écoulements par la mer, mais à travers une dimension spatiale. Cette dimension spatiale ne peut techniquement que s'analyser en période de débordement de cours d'eau, étant donné que si la rivière reste dans son lit, la lame d'eau va seulement augmenter et très peu s'élargir. Notre approche se veut originale, car nous avons choisi de reproduire une inondation avec un blocage des écoulements fluviaux par la mer sur la base d'observations et de reproduire ces mêmes événements sans ce blocage grâce à une modélisation hydraulique. Cette connaissance sur les événements passés et sur la compréhension d'effets de blocage déjà survenus est fondamentale pour pouvoir prédire ensuite leurs possibles évolutions avec les changements climatiques.

Dans un premier temps, notre but est de reproduire un débordement de cours d'eau, avec des données observées, coïncidant avec une tempête et ayant engendré un blocage des écoulements par la mer et donc une lame d'eau excédentaire. Dans un second temps, nous allons rejouer ce même débordement, mais en enlevant la lame d'eau excédentaire, afin de comprendre ce qui se serait produit dans la basse vallée s'il n'y avait pas eu de blocage des écoulements par la mer (Figure 5.1). En procédant par différence, entre une inondation avec et sans blocage des écoulements, nous pouvons alors estimer la surface et le volume d'eau excédentaire engendré par ce blocage. Dans cette recherche, **nous cherchons seulement à modéliser l'effet de blocage des écoulements par la mer et nous n'intégrons pas les effets des submersions marines**. Pour savoir quelle est la lame d'eau excédentaire issue du blocage des écoulements par la mer, durant le débordement du cours d'eau, nous utiliserons les analyses statistiques (modèles de régression) réalisées dans le chapitre 4.

Il est important de préciser **que les analyses statistiques, ainsi que les modèles utilisés, ne permettent pas de croiser des débordements de cours d'eau avec des submersions marines**. Notre unique but est de comprendre l'état du cours d'eau avec et sans blocage des écoulements, mais sans tenir compte des possibles intrants par la mer. Il est donc probable que les modèles présentés par la suite sous-estiment ce qui se serait vraisemblablement produit, puisque nous ne connaissons pas le volume d'eau apporté par la mer durant les tempêtes.

À l'heure actuelle, les modèles considèrent indépendamment les débordements de cours d'eau des submersions marines en raison d'un problème d'intégration de deux origines d'eau venant de deux milieux différents (Cooper, 2002 ; Brown *et al.*, 2007 ; Shen *et al.*, 2018).

[1] *Disponible sur* http://www.sandre.eaufrance.fr/

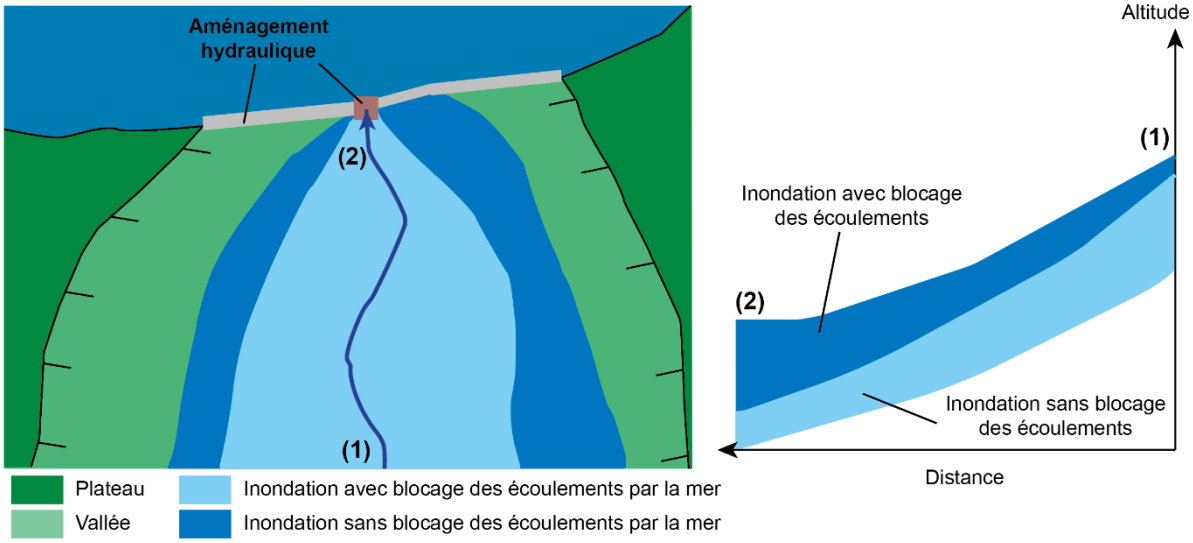


Figure 5.1 : Hypothèse d'un débordement de cours d'eau avec et sans blocage des écoulements par la mer

Plusieurs types de modèles sont classiquement employés pour retranscrire le comportement des cours d'eau à leur embouchure :

- Les **modèles mathématiques** utilisés pour reproduire les relations entre des variables d'entrée d'un bassin (indépendantes), telles que les précipitations, niveaux de nappe, etc., et des variables de sorties (dépendantes) telles que les débits ou les hauteurs d'eau (Hsieh *et al.*, 1998 ; Drobne et Lisec, 2009 ; Preacher *et al.*, 2006) ;
- Les **modèles récursifs** représentant un ensemble d'entités et d'états dirigés par un ensemble de conditions et de règles de transition agissant sur le fonctionnement de ces entités. Ce type de modélisation se présente sous la forme d'automates cellulaires et Systèmes Multi-Agents tels que le modèles LASCAR (LAndSCape structure And Runoff) ou PourousCity (Delahaye *et al.*, 2010 ; Banos et Sanders, 2013 ; Reulier *et al.*, 2017 ; Cortier, 2018) ;
- Les **modèles à base physique** permettant la mise en relation entre des variables d'entrée (précipitations, états hydriques, porosités, débits, etc.) et des variables de sorties (débits, hauteurs d'eau, transferts sédimentaires, etc.) au sein d'une dimension spatiale. Les variables sont reliées par des relations statiques (coefficient de rugosité, géologie, etc.) et dynamiques (vitesses de propagation des particules, intensités des écoulements, etc.) (Ambroise, 1999 ; Payraudeau, 2002 ; Beckers et Degré, 2010).

Des analyses statistiques ont été utilisées en première approche sur les effets de blocage des écoulements de la rivière par la mer (cf. chapitre 4), mais ne permettent pas de retranscrire spatialement leur comportement. Les modèles récursifs sont efficaces et tendent à se développer, mais nécessitent une longue phase d'élaboration et de tests pour que le modèle puisse fonctionner. Les modèles à base physique sont aujourd'hui largement répandus, plus ou moins facile d'utilisation et sont pour certains en libre accès et extrapolables même en l'absence de données jaugées (Abbott *et al.*, 1984 De Roo, 1999 ; Rau *et al.*, 2017). C'est pourquoi dans ce travail, nous utiliserons un modèle de ce type.

Au sein des modèles à base physique, deux types de modèle ont été développés pour la représentation des flux liquides dans les cours d'eau :

(1) Les **modèles hydrologiques** utilisés pour la quantification des débits grâce à des conditions météorologiques et/ou hydrogéologiques (Brandolini et Cevasco, 2015 ; Bouadi *et al.*, 2017 ; Woldesenbet *et al.*, 2017 ; Zhang *et al.*, 2016) ;

(2) Les **modèles hydrauliques**, tels que FLOW 3-D, HEC RAS, utilisés dans le cas d'étude sur les propriétés mécaniques des flux liquides et/ou solides, ainsi que de la qualité de ces flux pour des données de débit connues (Ernst *et al.*, 2010 ; Sampson *et al.*, 2015 ; Ahiablame et Shakya, 2016 ; Dimitriadis *et al.*, 2016 ; Abdulrazzak *et al.*, 2019).

La modélisation hydraulique HEC RAS (*Hydrologic engineering center's river analysis system*) développée par l'US Army Corps of Engineers[2] (version 5.0.7.) est particulièrement efficace pour modéliser le comportement mécanique d'écoulements stables ou instables sur de petites sections d'un territoire (Ostad-Ali-Askari et Shayannejad, 2015 ; Quirogaa *et al.*, 2016 ; İcaga *et al.*, 2016 ; Abdulrazzak *et al.*, 2018). Les avantages de ce modèle sont liés à une mise à jour régulière des outils de modélisation ainsi qu'une bonne optimisation du code source permettant un calcul rapide des modélisations (Bernoulli, 1738 ; Ochoa *et al.*, 2016 ; Vargas *et al.*, 2019). L'inconvénient principal de ce modèle est qu'il s'applique pour des cours d'eau à faible pente (> 10 %). Une pente supérieure à 10 % peut engendrer des instabilités et fausser proposer des résultats aberrants. Les fonds des basses vallée littorale normandes présente cependant des pentes faibles inférieur à 1 % propice et est particulièrement propice à cette modélisation.

Cette modélisation hydraulique va nous permettre de produire des modélisations de débordement de cours d'eau dans les basses vallées afin de comprendre l'évolution spatiale d'une inondation durant un blocage des écoulements par la mer en analysant les secteurs préférentiels d'accumulation des eaux, les surfaces d'eau excédentaires ainsi que les volumes d'eau excédentaires. Pour cela, nous faisons une modélisation avec des données observées puis une seconde modélisation avec des données prédites (modèles de régression linéaire).

Ce chapitre comprend quatre sections en dehors de l'introduction (section 5.1) et de la conclusion du chapitre (section 5.6). La section 5.2 présente les basses vallées retenues, ainsi que les données intégrées à la modélisation hydraulique sous HEC RAS. La section 5.3 présente la géométrie de la modélisation hydraulique sur les basses vallées de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle. La section 5.4 détaille les résultats de modélisation des débordements de cours avec et sans blocage des écoulements par la mer. La section 5.5 est la synthèse et l'analyse des principaux résultats ainsi qu'une discussion sur le blocage des écoulements.

5.2. Préparation des données intégrées à la modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique HEC RAS repose sur l'intégration de jeux de données topographiques (naturelles ou artificielles), hydrographiques et hydrologiques. Le choix et la précision de ces données d'entrée sont fondamentaux puisqu'ils vont définir la qualité des résultats de modélisation du débordement des cours d'eau. L'objectif de la section 5.2 est ainsi de décrire les basses vallées retenues pour l'élaboration des modélisations et de présenter l'ensemble des données vectorielles, rasters et attributaires nécessaires à la mise en place des modélisations hydrauliques.

La section 5.2.1 présente des basses vallées d'études retenues (La Touques, Le Dun de L'Yères et La Bresle) pour la modélisation hydraulique. La section 5.2.2 présente le modèle numérique de terrain utilisé à travers la comparaison du RGE Alti®, de la BD Alti® et des données Lidar et

[2] *Logiciel disponible en libre accès sur https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/*

le calcul de la marge d'erreur des MNT amenant au choix du MNT intégré à la modélisation hydraulique. La section 5.2.3 est la détermination et la présentation de tempêtes majeures en lien avec des débordements de cours d'eau à l'échelle des basses vallées d'étude intégrées à la modélisation des flux liquides. Ces tempêtes majeures sont choisies en fonction de la coïncidence avec les plus hautes lames d'eau observées dans les basses vallées étudiées.

5.2.1. Bassins d'études retenus pour l'application des modélisations hydrauliques

Pour la mise en place de la modélisation hydraulique, nous avons retenu les quatre basses vallées sur lesquelles une analyse statistique a été réalisée afin de connaître la lame d'eau excédentaire en période de tempête. Pour chaque basse vallée, nous présentons l'occupation des sols (utilisés pour les coefficients de rugosité) ainsi que la morphologie du cours d'eau. Ensuite, nous nous focalisons plus précisément sur leurs aménagements hydrauliques.

Quatre basses vallées sont considérées : La basse vallée de La Touques (section 5.2.1.1), la basse vallée du Dun (section 5.2.1.2), la basse vallée de L'Yères (section 5.2.1.3) et la basse vallée de La Bresle (section 5.2.1.4).

5.2.1.1. La basse vallée de La Touques

La basse vallée de La Touques, délimitée selon la BD Carthage (Sandre), s'étend sur une superficie de 136 km² et une distance d'environ 11 km à vol d'oiseau, de Pont-L'Évêque jusqu'à l'exutoire de La Touques à Deauville et Trouville-sur-Mer (Figure 5.2).

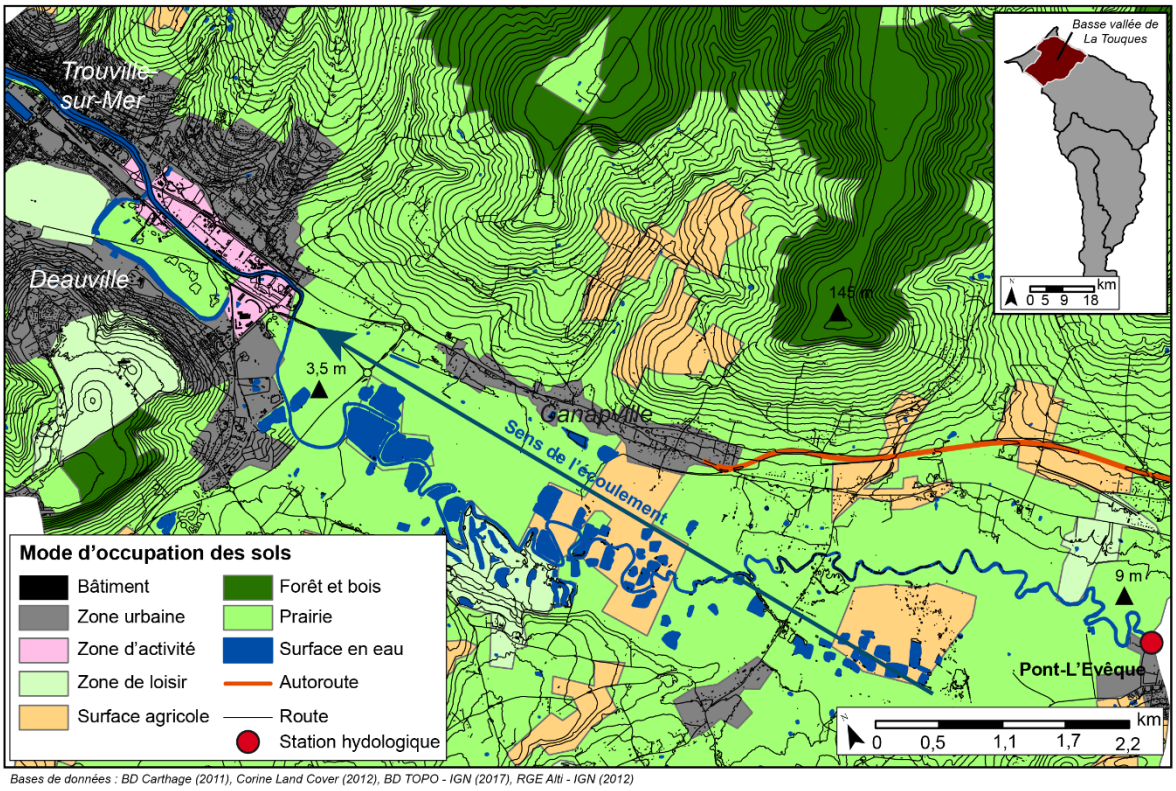


Figure 5.2 : Occupation des sols sur la basse vallée de La Touques de la station hydrologique à Pont-L'Évêque jusqu'à Deauville et Trouville-sur-Mer

La plaine alluviale de la basse vallée est largement dominée par des prairies et parcourue par de nombreux canaux, rigoles et gouttières (*i.e.* dépression concave en dessous du niveau moyen du cours d'eau – DDTM, 2016). La plaine est composée de deux parties : (1) un marais littoral

au plus proche de la rivière, des bassins de rétention et des gouttières (surface en eau) qui correspond au lit mineur ; (2) des prairies naturelles et agricoles (pâturage) entourées de haies, ainsi que d'un complexe système d'irrigation, au-delà du marais et dans la grande partie du lit majeur.

De Pont-L'Évêque jusqu'en amont de Deauville et Trouville-sur-Mer, La Touques dispose d'une vaste plaine inondable peu aménagée. Les principaux enjeux de la basse vallée se situent au niveau de Deauville et Trouville-sur-Mer, déconnectés en partie de la plaine inondable par une levée sur la départementale D27. Des aménagements épars sont localisés dans la plaine inondable et sont composés en grande majorité de fermes (haras) ou d'infrastructures de loisirs tels que des terrains de golfs, jardins, parcs ou campings (Figure 5.3).

Figure 5.3 : Principaux paysages de la basse vallée de La Touques de Pont-L'Évêque à Deauville

La Touques est exhaussée de son lit au-dessus de la plaine alluviale entraînant des inondations dans l'ensemble de la vallée en cas de débordement du cours d'eau. En amont de la basse vallée, le lit mineur et le lit majeur sont caractérisés par un profil en toit (*i.e.* surélevé sur la rivière et affaissé au niveau du lit mineur et majeur) (Figure 5.4 – profil n°1). Cette morphologie particulière est issue de l'influence de la mer et des pentes faibles (> 1 %) de la basse vallée, engendrant un ralentissement des écoulements et des dépôts accrus sur les berges (DDTM, 2016). Bien que les berges (naturelles ou artificielles) protègent la basse vallée des

débordements la majeure partie du temps, de nombreux écoulements souterrains ont lieu en dessous du lit majeur favorisé par un réseau de drainage dense.

Depuis la station hydrologique jusqu'à la D27 en amont de Deauville (Figure 5.4), La Touques est laissée à un état naturel sans artificialisation des berges. De nombreux bassins sont disposés de part et d'autre de la Touques afin de limiter les inondations en cas de débordement de cours d'eau. La D27 est surélevée de 2 m par rapport à la plaine inondable et fait office de « barrage » aux écoulements. Au-delà de la D27, les écoulements se concentrent en un même point (Figure 5.4 – profil n°2) et la profondeur du lit passe d'environ 1,5 m, en amont de la basse vallée, à 6 m en aval de la basse vallée.

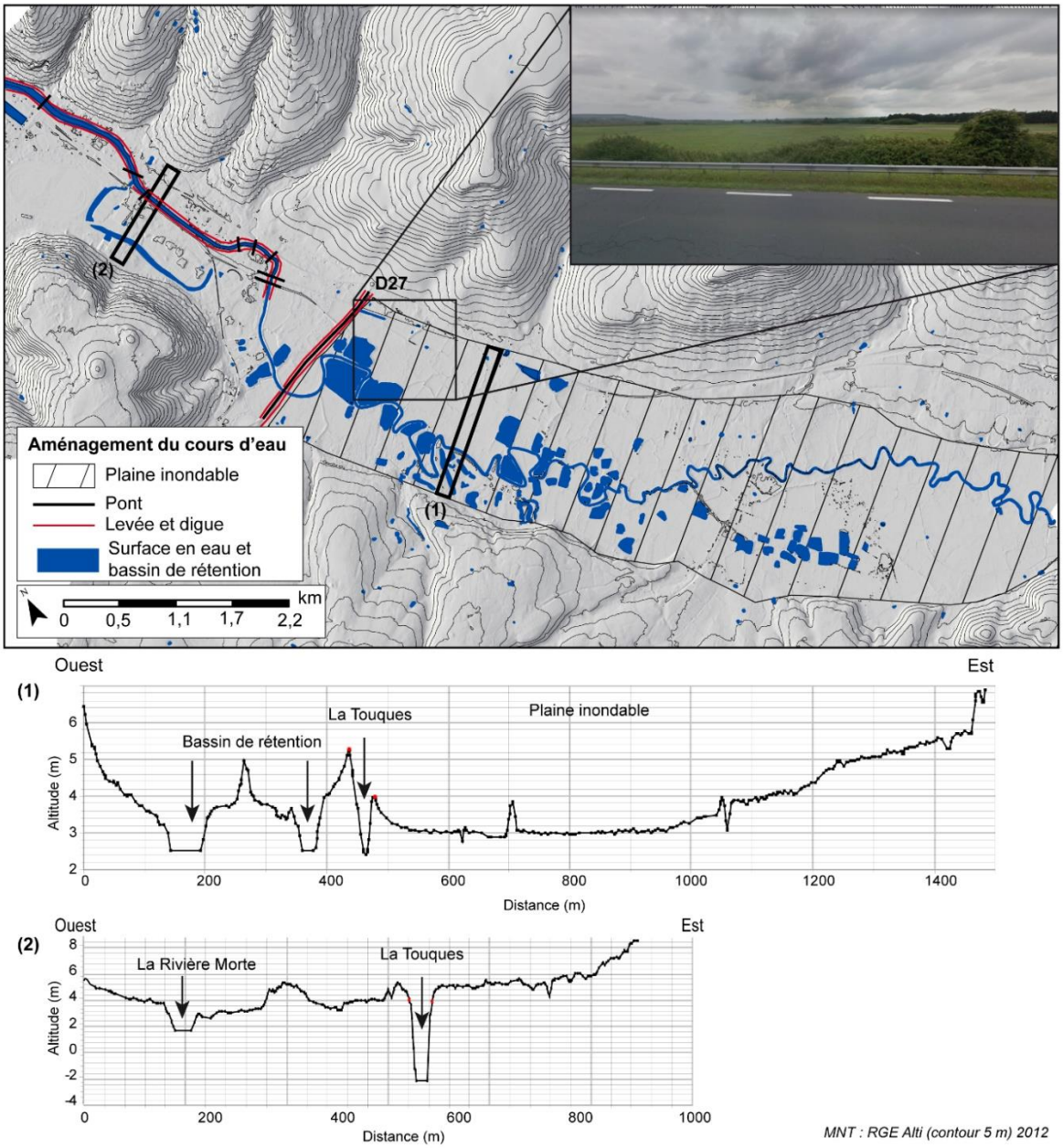


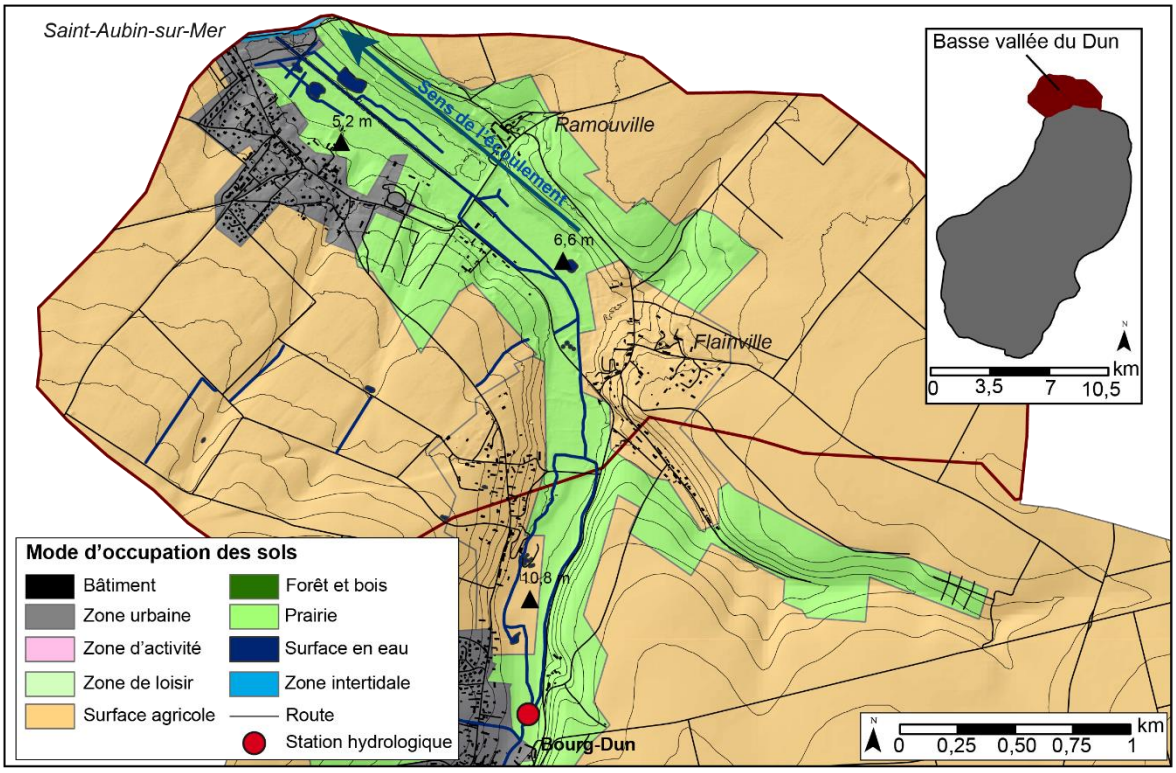
Figure 5.4 : Aménagement présent le long de La Touques dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m)

Les inondations liées à des débordements de cours d'eau se produisent donc en majorité dans la plaine inondable de la basse vallée de La Touques et restent rares au-delà de la D27. À partir

de ce point, les inondations sont liées à du ruissellement en milieu urbain et/ou à des conjonctions entre des submersions marines par paquets de mer (haut niveau marin) et d'importantes lames d'eau sur La Touques. Le dernier événement de débordement de cours d'eau en lien avec une tempête majeure s'est produit durant la tempête Eleanor les 3 et 4 janvier 2018. À l'heure actuelle, aucun événement de référence de niveau centennale n'a été enregistré depuis les dernières décennies et les cartes d'aléas des PPRs ont été produites par extrapolation entre les laisses de crues observées et les cotes hydromorphologiques (DDTM, 2016).

5.2.1.2. La basse vallée du Dun

Pour des raisons de facilité d'intégration à la modélisation, la basse vallée du Dun a été définie en aval de la station du Bourg-Dun après la réunification des deux drains du Dun (Figure 5.5). Cette limite permet d'une part de simplifier la modélisation hydraulique et d'autre part de considérer exclusivement les données Lidar rééchantillonnées à 5 m et intégrées au RGE Alti (*cf.* section 5.2.2). La basse vallée s'étend ainsi sur une superficie 7 km², soit 6,5 % de la superficie totale du bassin, et pour une distance à la mer de 2,30 km. La station hydrologique à Bourg-Dun est localisée à environ 3,8 km de la mer et n'est alimentée par aucun autre affluent de la station jusqu'à l'exutoire.



Bases de données : BD Carthage (2011), Corine Land Cover (2012), BD TOPO - IGN (2017), RGE Alti - IGN (2012)

Figure 5.5 : Occupation des sols sur la basse vallée du Dun de la station hydrologique à Bourg-Dun jusqu'à Saint-Aubin-sur-Mer

De la station hydrologique de Bourg-Dun jusqu'à Flainville, la plaine alluviale du Dun est constituée par des prairies naturelles ainsi que par des systèmes culturaux et parcellaires complexes avec des pentes comprises entre 1 et 2 %. Des habitations et fermes agricoles (bâtiment épars) sont également présentes à proximité du cours d'eau (moins de 100 m). En aval de la basse vallée, des prairies naturelles ouvertes sont largement présentes. Des aménagements sont localisés à proximité du cours d'eau, en rive gauche, et correspondent à

des habitats individuels ainsi que des terrains de sport. À l'exutoire du Dun, une digue sépare le cours d'eau de la mer où un camping est installé (camping-car), ainsi que quelques aménagements liés aux activités touristiques. Les versants et le plateau de la basse vallée sont largement dominés par les activités agricoles en *openfield*.

Le Dun se caractérise par un écoulement lent avec un faible débit moyen mensuel aux alentours de 0,3 $m^3.s^{-1}$ de novembre à janvier (*cf.* **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Trois phénomènes sont à l'origine des inondations dans la basse vallée : (1) les débordements de cours d'eau avec des vitesses d'écoulement rapide (> 1 $m^3.s^{-1}$) à lent (< 1 $m^3.s^{-1}$) et pour des durées de quelques jours à quelques semaines (DDTM, 2010) ; (2) du ruissellement superficiel rapide se produisant en quelques heures ; (3) des remontées de nappes très lentes pouvant durer plusieurs semaines à plusieurs mois. Ces inondations vont principalement se produire dans la basse vallée du Dun et sont en partie contrôlées par une succession de levées commençant au pont, à l'ouest de Ramouville, jusqu'à l'embouchure du bassin (Figure 5.6).

Figure 5.6 : Principaux paysages de la basse vallée du Dun de Ramouville à Saint-Aubin-sur-Mer

En amont de la basse vallée, le chenal et le profil sont très légèrement encaissés avec la présence d'une gouttière en extrémité gauche et droite de la plaine alluviale (Figure 5.7 – profil n°1). Au-delà de la première levée (sur la D75), le Dun tend à s'exhausser de son lit. Plus le drain est proche de l'embouchure, plus l'exhaussement du lit s'accentue en raison de l'influence plus

importante de la mer (Figure 5.7 – profil n°2). La profondeur du chenal est en moyenne de 1 m de l'amont jusqu'à l'aval de la basse vallée sans différence notable. La hauteur de la première levée est de 1,5 m et fait office de « barrage » aux écoulements avec la présence de deux conduits réunissant les deux bras du Dun en un seul point (Figure 5.7). En amont de cette levée, le chenal est laissé à son état naturel. En aval, il est canalisé avec la construction de digues jusqu'à l'embouchure à la mer. À l'interface à la mer, une digue a été construite avec deux conduits pour laisser s'écouler Le Dun. Entre ces deux sections, le lit bénéficie d'une plaine inondable marquée par la présence de bassins de rétention des eaux pluviales.

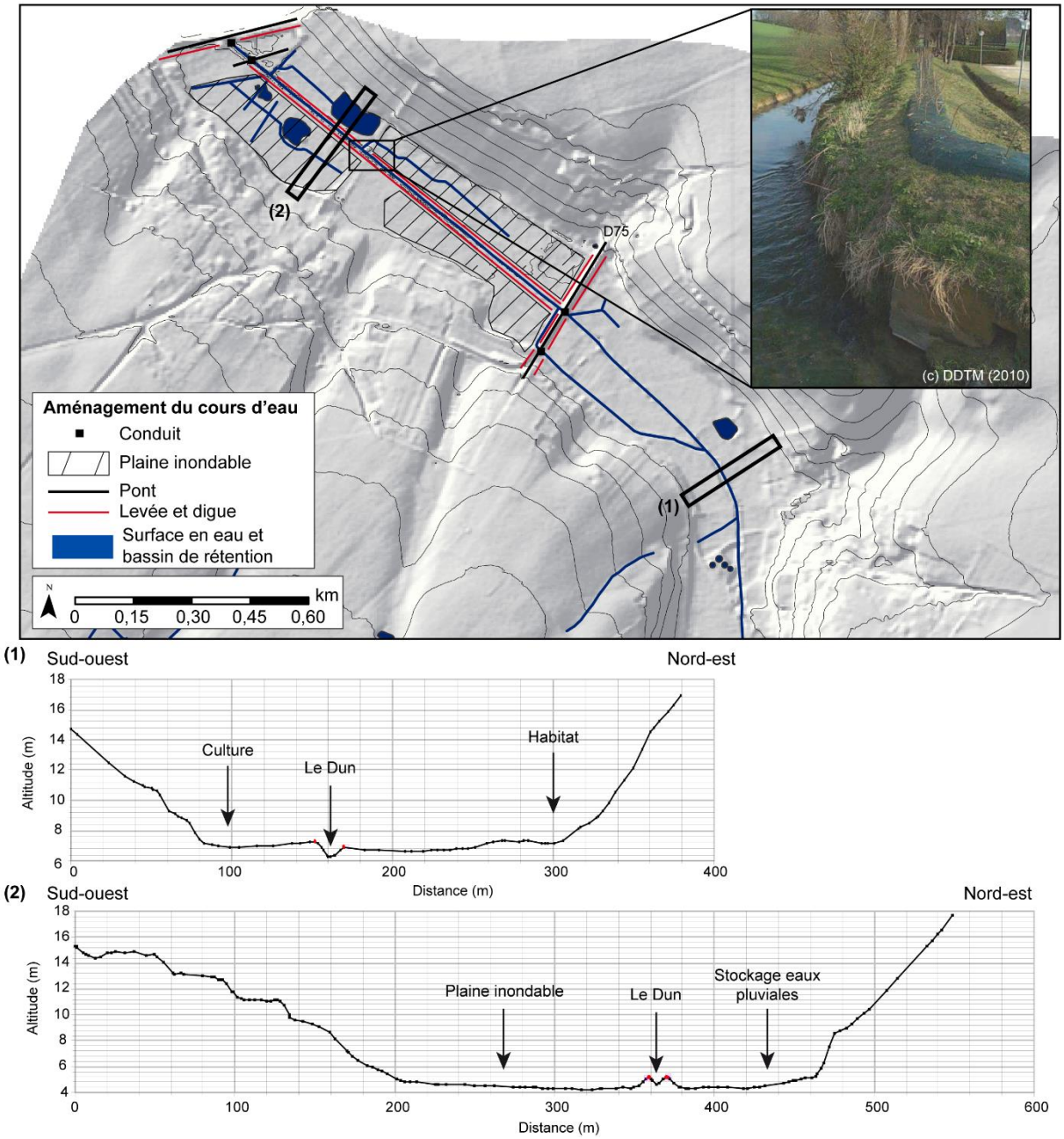


Figure 5.7 : Aménagements présents le long du Dun dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m)

L'événement majeur de débordement de cours répertorié est daté du 26 décembre 1999 et coïncide avec la tempête Lothar (avec une période de retour centennale). Dans la basse vallée, les bâtiments présents ont été inondés jusqu'à 1,20 m et pour des débits moyens jusqu'à 27 fois

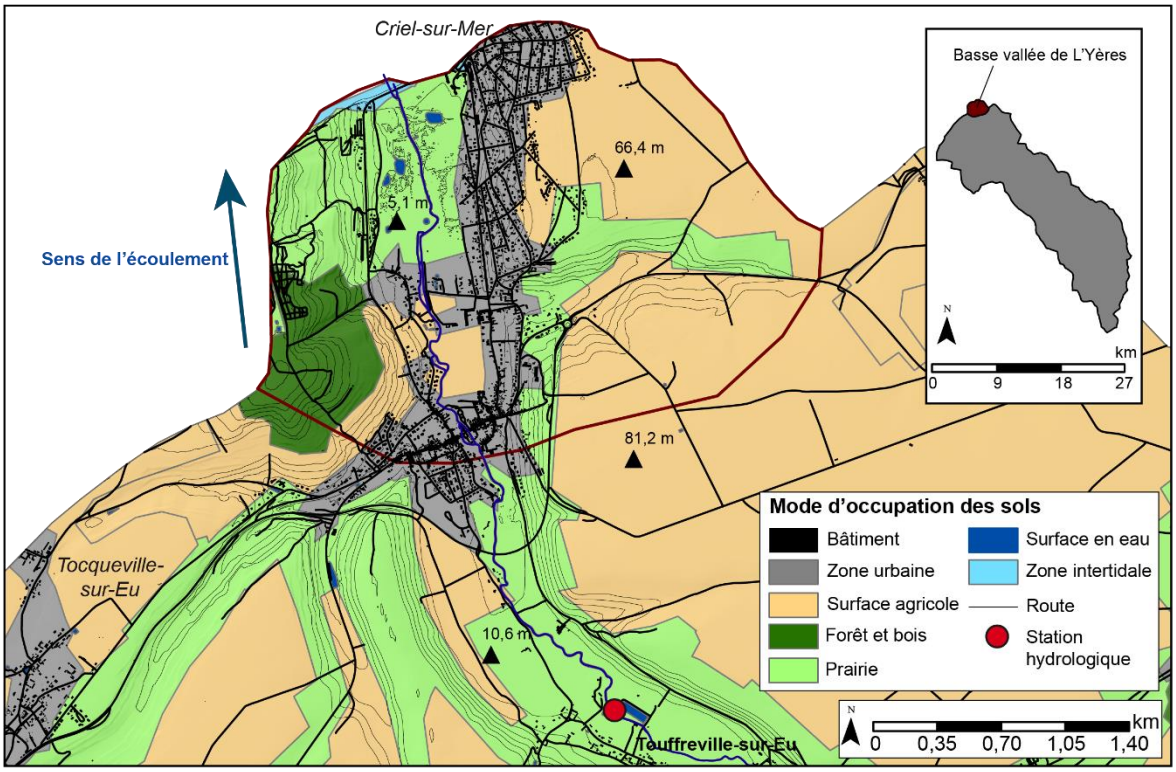
supérieures aux moyennes mensuelles (pic de débit maximal instantané de 8,25 $m^3.s^{-1}$ le 26 décembre 1999). La totalité de la vallée a été inondée en fin de journée et le pic de marée haute a été enregistré en milieu d'après-midi. La vidange de la vallée s'est ensuite étalée sur deux semaines (DDTM, 2010).

5.2.1.3. La basse vallée de L'Yères

Les limites littorales de la basse vallée de L'Yères ont été déterminées par le conservatoire du littoral et s'étendent de Criel-sur-Mer jusqu'à l'embouchure de L'Yères. La distance depuis l'embouchure jusqu'à la limite artificielle de la rue de la Libération à Criel-sur-Mer est de 2,1 km pour une superficie totale de 5,3 km^2. La station hydrologique utilisée comme données d'entrée à la modélisation (mathématique et hydraulique) est localisée 1 km en amont de la basse vallée à Touffreville-sur-Eu (Figure 5.8). La basse vallée est divisée en deux parties :

(3) En amont, à Criel-sur-Mer et sur environ 1 km, l'urbanisation domine largement l'espace de divagation du cours d'eau avec la présence de moulins au-dessus du chenal (Figure 5.9 – cliché n°3), mais également par la présence d'habitation sur les berges de L'Yères ;

(4) En aval, les prairies humides correspondent aux parcelles du Conservatoire du littoral (Figure 5.8) où L'Yères dispose d'un espace de divagation d'environ 400 m de large et 1 km de longueur. Cet espace est géré par le Conseil départemental de la Seine-Maritime et assure la surveillance, l'entretien et le suivi scientifique (intérêt floristique et faunistique).



Bases de données : BD Carthage (2011), Corine Land Cover (2012), BD TOPO - IGN (2017), RGE Alti - IGN (2012)

Figure 5.8 : Occupation des sols sur la basse vallée de L'Yères de la station hydrologique à Touffreville-sur-Eu jusqu'à Criel-sur-Mer

Le versant de rive droite de la basse vallée est marqué par la présence de nombreux pavillons, tandis que le versant en rive gauche (en aval) comprend un camping (Les Mouettes) et des

prairies. La digue de protection est ponctuellement utilisée comme parking et comme camping (camping-car) durant la période touristique estivale.

Cette basse vallée est impactée par trois types d'inondations : (1) des débordements de cours d'eau par L'Yères ; (2) des crues turbides dans les vallons secs, ainsi que du ruissellement dans les zones urbaines ; (3) des submersions marines par paquets de mer engendrées par des tempêtes majeures (e.g. tempête Lothar le 26 décembre 1999) (DDTM, 2016). Pour rappel, les moyennes mensuelles maximales sont de 3,8 $m^3.s^{-1}$ durant le mois de février ce qui se traduit par une lame d'eau moyenne de 0,44 m. Depuis la digue de protection (Figure 5.9 – clichés n°1 et n°2), 1,75 km du linéaire de L'Yères sont localisés en zone basse jusqu'à 2,5 m sous un niveau marin centennal (données issues de la DGPR, 2011).

Figure 5.9 : Principaux paysages de la basse vallée de L'Yères à Criel-sur-Mer

En amont de la basse vallée, L'Yères est en partie exhaussé de son lit avec une altitude du fond du chenal à 7,7 m, tandis que le point le plus bas de la vallée est situé entre 6,5 m et 7 m (Figure 5.10 – profil n°1) et pour des pentes comprises entre 1 % et 2 %. En aval de la basse vallée, le profil du lit est relativement plat avec des pentes inférieures à 1 % pour une profondeur du chenal d'environ 1 m.

Depuis Criel-sur-Mer jusqu'aux parcelles du Conservatoire, des levées artificielles (murs d'habitation, murets de brique, perrés, etc.) et naturelles contraignent L'Yères à rester dans son lit. Le cours d'eau est également contraint par deux conduits localisés en trois points sur : (1) le

pont de la rue de la Libération ; (2) à l'est de la rue du Moulin à Huile et (3) sur la digue de protection à la mer localisée sur la D222 (Figure 5.10). La hauteur de la digue de protection est de 8 m et les deux conduits (largeur de 1 m) permettent à L'Yères de s'écouler jusqu'à la mer. La plaine inondable en aval de la basse vallée de L'Yères est composée de trois bassins de rétention des eaux pluviales et les berges sont régulièrement entretenues par Conseil général pour éviter les embâcles au niveau de la digue.

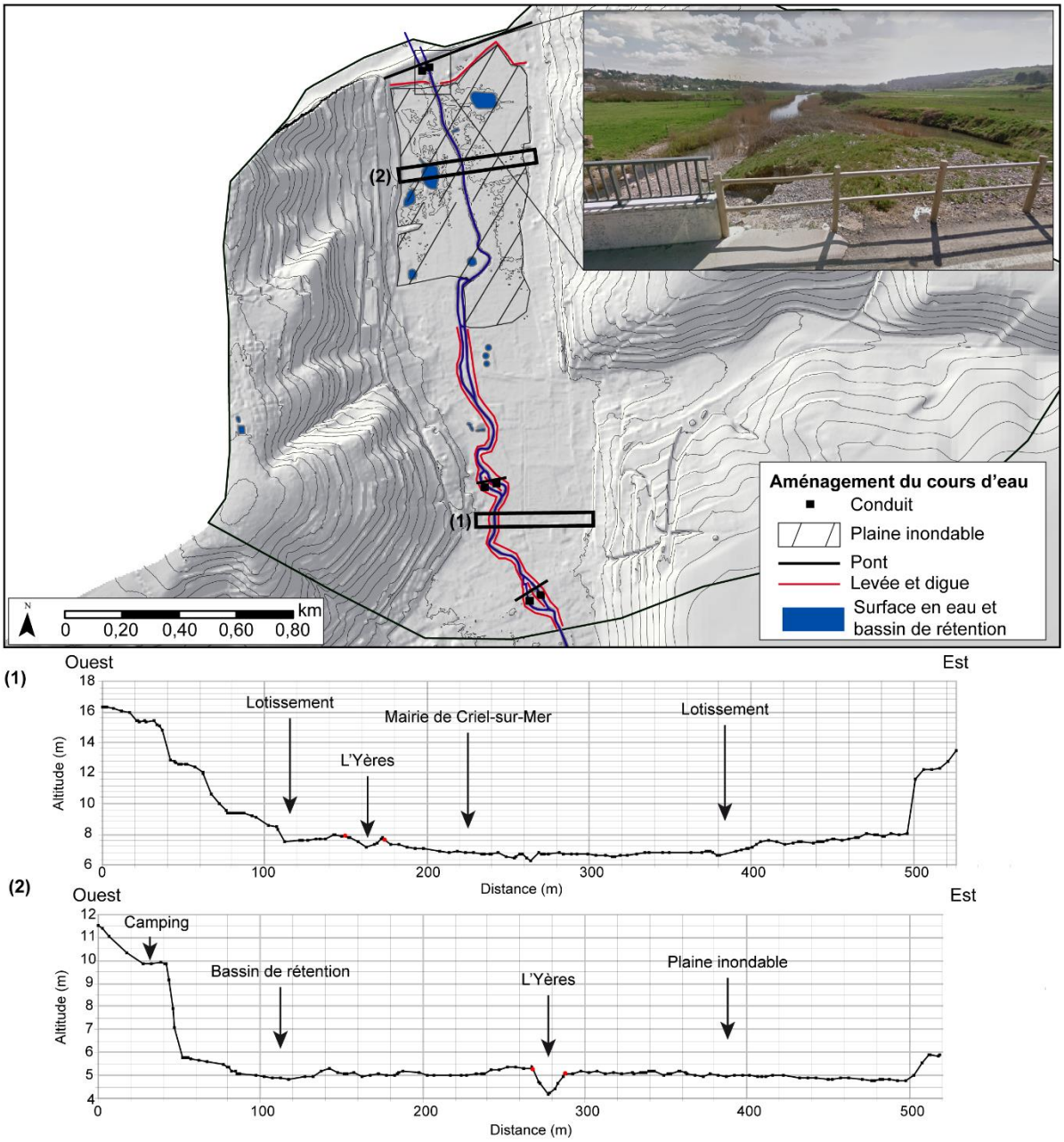


Figure 5.10 : Aménagements présents le long de L'Yères dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m)

Le débordement de cours d'eau utilisé comme événement de référence sur L'Yères est celui du 26 décembre 1999. La lame d'eau mesurée par la station de Touffreville-sur-Eu a été de 1,09 m pour des débits atteignant les 10 $m^3.s^{-1}$. Durant cette tempête, le débit et la lame d'eau ont été trois fois supérieurs aux moyennes mensuelles de novembre à février. Le débordement a atteint jusqu'à 80 cm dans le centre-ville de Criel-sur-Mer (DDTM, 2016) et coïncide avec la tempête

Lothar où les hauteurs d'eau en mer ont été supérieures à 10 m (Costa, 1997 ; Letortu *et al.*, 2016) et les hauteurs de houles étaient supérieures à 5 m (DDTM, 2016). Selon la modélisation réalisée pour les cartes d'aléas du PPR de L'Yères, le débordement de décembre 1999 correspond à une période de retour entre 10 et 20 ans. Le débit centennal de L'Yères a été estimé à 25,46 $m^3.s^{-1}$ selon la DDTM (2016).

5.2.1.4. La basse vallée de La Bresle

Afin de répondre aux besoins de la modélisation hydraulique, la basse vallée de La Bresle est délimitée à partir de la station hydrologique de Ponts-et-Marais et va jusqu'à l'exutoire de la Bresle à Mers-les-Bains et Le Tréport (Figure 5.11). La zone étudiée s'étend ainsi sur 6 km pour une superficie d'environ 34 km^2. De la station hydrologique de Ponts-et-Marais à la commune d'Eu, la basse vallée est composée de prairies (humides) et de forêts sans artificialisation et laissant un espace de divagation pour le cours d'eau.

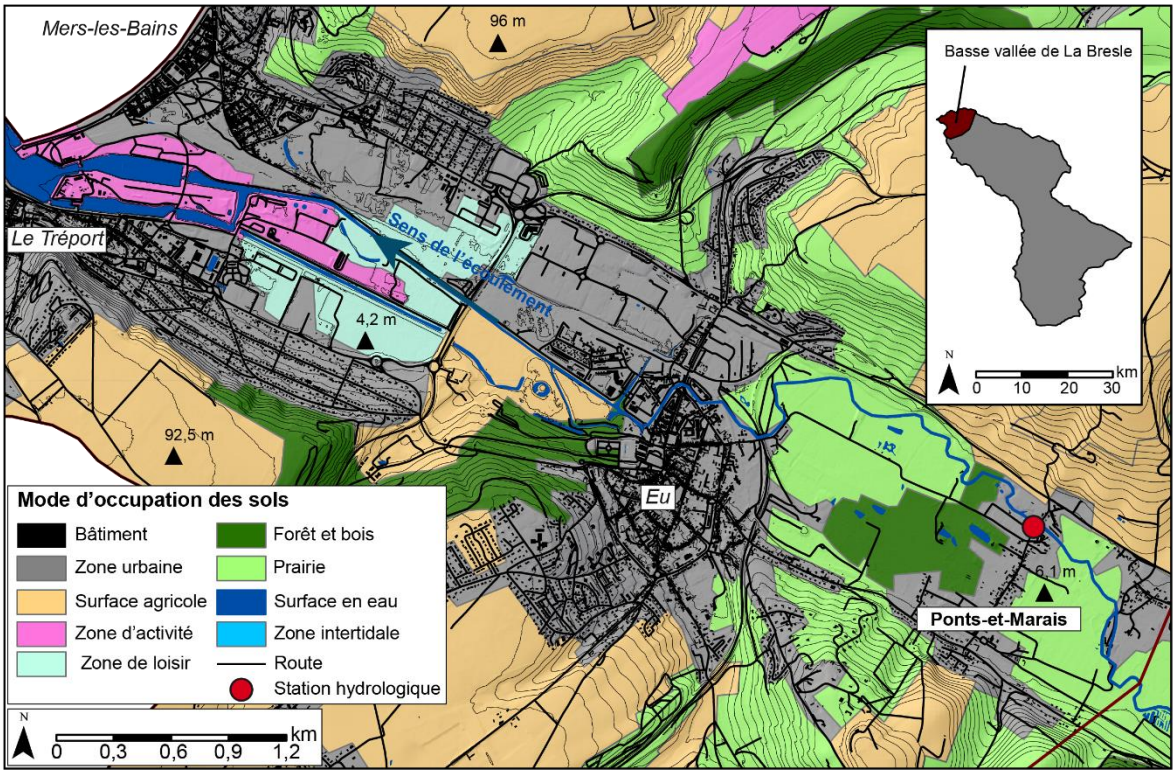


Figure 5.11 : Occupation des sols sur la basse vallée de La Bresle de la station hydrologique à Ponts-et-Marais jusqu'au Tréport et Mers-les-Bains

Au-delà de la commune d'Eu, le cours d'eau est chenalisé et bénéficie d'un complexe système de gestion des eaux mis en place par le syndicat mixte du Pays Interrégional Bresle Yères. En aval de la basse vallée, La Bresle se divise en deux drains sur une distance de 3 km avec la mise en place de l'ancien canal de Penthièvre (Figure 5.12 – cliché n°2). De l'amont à l'aval de la basse vallée, les pentes sont inférieures à 0,5 %. En rive gauche (Le Tréport) et en rive droite (Mers-les-Bains) à l'embouchure de La Bresle et du canal, l'occupation des sols est entièrement artificialisée avec la présence d'une vaste zone d'activité entre les deux drains, ainsi que d'un fort tissu urbain (habitat) dans le lit majeur.

Le débit moyen mensuel maximum est enregistré en mars avec 8,9 $m^3.s^{-1}$ et pour une lame d'eau moyenne de 0,41 m. L'aval de la basse vallée a la particularité d'être fortement et

quotidiennement influencé par la mer, ce qui a nécessité la mise en place d'une jetée portuaire. La Bresle a la particularité d'être contrôlée par une série de porte-écluses, ainsi que d'un clapet au niveau du port (Figure 5.12 – cliché n°3). Ce système de clapet est commandé par des capteurs de niveau qui maintiennent la hauteur d'eau du bassin à 7,50 m (ZH) (CETE, 2011). Si le niveau de l'avant-port est inférieur, le clapet s'ouvre pour maintenir un certain niveau dans le port. Durant les marées hautes, le clapet est entièrement fermé (cote d'arase à 11 m ZH) et La Bresle ne peut plus s'écouler dans la mer. Le canal et le bassin de pêche font alors office de bassin de stockage des eaux en attendant que le niveau marin diminue.

La nappe des alluvions de la Bresle (dépôts alluvionnaires sablo-graveleux) constitue le fond du chenal et conditionne l'activité hydraulique du cours d'eau (DDTM, 2018). Les phénomènes de remontées de nappes sont systématiquement concomitants à des phénomènes de débordement de cours d'eau et, d'après les différents rapports d'expertises, la quantité d'eau apportée par ces remontées est négligeable en regard de l'apport du débordement (CETE, 2011 ; DDTM, 2018)

Figure 5.12 : Principaux paysages de la basse vallée de La Bresle (Le Tréport, Mers-les-Bains et Eu)

La basse vallée de La Bresle est symétrique et à fond plat, raccordé à un système de drainage complexe remontant sur les versants et le plateau. La profondeur du chenal, en amont de la basse vallée, est d'environ 50 cm (Figure 5.13 – profil n°1). Le cours d'eau dispose d'une plaine

inondable d'environ 1 km de long sur 700 m de large (limitrophe à la commune de Eu). La plaine inondable (prairie humide) est délimitée en aval par des levées avec une hauteur moyenne de 4 m et par les versants. À l'exutoire (avant les jetées portuaires), la profondeur du chenal passe à 1,5 m et la profondeur du canal est de 2,5 m (Figure 5.13 – profil n°2). À partir d'Eu, les berges sont entièrement artificialisées et le canal est contrôlé par une série de conduits de 0,8 m de largeur sur 0,9 m de hauteur (CETE, 2011). Le bassin de pêche est le seul exutoire de La Bresle.

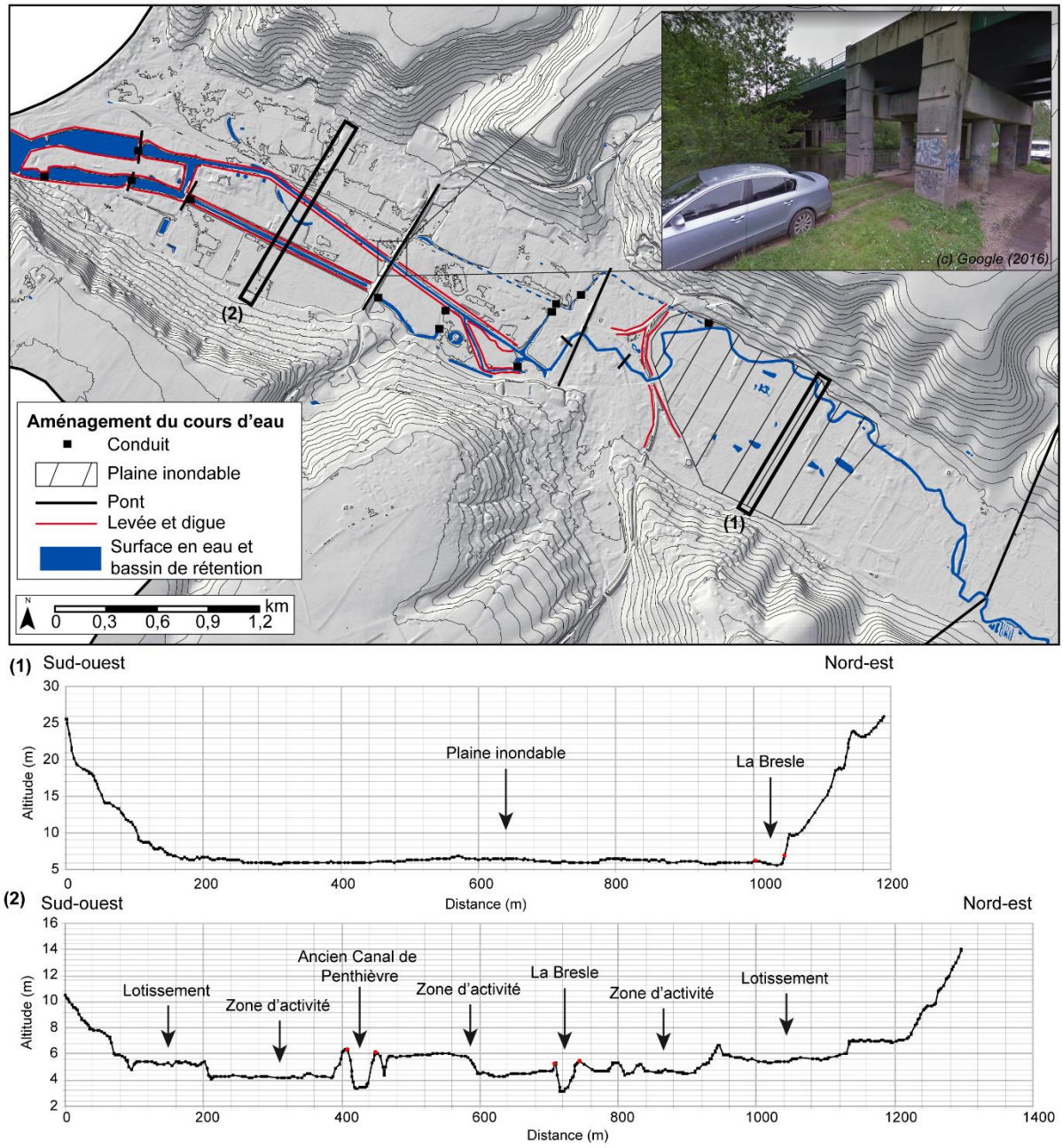


Figure 5.13 : Aménagements présents le long de La Bresle dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m)

Au regard des données issues de la station hydrologique à Ponts-et-Marais, le débordement de cours d'eau le plus important s'est produit le 27 décembre 1999 avec un débit maximal instantané mesuré à 18,8 $m^3.s^{-1}$ et une lame d'eau de 1,08 m. Cet événement est concomitant aux événements de tempêtes majeurs Lothar et Martin survenus du 26 au 27 décembre 1999.

5.2.2. Choix des modèles numériques de terrain

La qualité des résultats issus des modélisations est en grande partie liée à la résolution des données topographiques altimétriques et planimétriques. Plus la résolution du modèle numérique est fine, plus le temps de traitement des modélisations est important et plus les risques d'anomalies augmentent. *A contrario*, une résolution trop faible empêche une bonne visualisation du chenal, des digues et des levées pour le modèle et ne s'appliquerait pas pour une analyse locale des effets de concomitance hydrologique. La caractérisation du meilleur rapport entre échelle de visualisation et résolution de MNT (modèle numérique de terrain) est donc une étape cruciale dans le paramétrage des modèles hydrauliques.

La section 5.2.2.1 présente et compare les différents MNT disponibles sur les sites. Le calcul des marges d'erreur des MNT est exposé à la section 5.2.2.2 et le choix du MNT intégré à la modélisation hydraulique est détaillé à la section 5.2.2.3.

5.2.2.1. Comparaison des MNT et de leurs résolutions

Quatre modèles numériques de terrain ont été comparés qualitativement et quantitativement avec une base de points GPS issue du référentiel géodésique de l'IGN et avec deux bases de données de l'IGN : le MNT RGE Alti® et le MNT Litto3D®. Le RGE Alti® est composé de données hétérogènes et remplace la BD Alti® en couvrant le territoire national à des résolutions de 1 et 5 m (Tableau 5.1). Le RGE Alti® est issu de : (1) la technologie Lidar est déployée pour les zones inondables et littorales, et sur les grands massifs forestiers ; (2) la technologie Radar est utilisée sur les zones de montagne ; (3) les techniques de corrélation de photographies aériennes sont utilisées sur le reste du territoire (avec l'utilisation de recouvrement stéréoscopique plus important en zone urbaine) ; (4) les données BD Alti® (de résolution initiale 25 m) sont intégrées dans le RGE Alti® quand de nouvelles acquisitions ne sont pas encore disponibles.

Tableau 5.1. Comparatif des modèles numériques avec une résolution inférieure ou égale à 25 m disponibles sur les sites d'étude

Donnée	Résolution initiale	Précision planimétrique	Précision altimétrique
Litto3D®	1 m	0,4 - 0,5 m	0,2 à 0,5 m (contrôlée à 0,3 m)
Données radar	5 m	Non contrôlée	< 7 m (valeur extrême à très forte pente)
Corrélation photo aérienne	1 m	Non contrôlée	0,5 à 0,7 m
BD ALTI®	25 m	Non contrôlée	2 à 8 m

La résolution initiale de livraison de la donnée litto3D® est de 1 m. La précision altimétrique d'un levé LIDAR est principalement limitée par celle de la trajectographie et est de l'ordre de 15 à 20 cm. La précision planimétrique dépend quant à elle directement de la hauteur de vol : elle varie de 20 à 50 cm pour des altitudes variant de 1000 à 3000 m (IGN, 2015).

À défaut de disposer du RGE Alti® à une résolution de 1 m, la donnée Litto3D® 1m a été intégrée à l'analyse afin de déduire l'erreur moyenne du RGE Alti® 1m sur la bande littorale. En effet, la donnée RGE Alti® s'appuie exclusivement sur la donnée Litto3D® pour les zones couvertes par la donnée Lidar, à savoir une bande littorale d'environ 2 km ainsi que les zones basses potentiellement inondables en arrière littoral. À partir de ces deux jeux de données, l'analyse s'est portée sur l'axe Houlgate-Honfleur (Calvados), en remontant jusqu'à Pont-l'Évêque (≃ 10 km à l'intérieur des terres) et sur l'axe Quiberville-Penly (Seine-Maritime), en remontant jusqu'à Lindebeuf (≃ 20 km dans les terres).

5.2.2.2. Calculs des marges d'erreur topographiques

Les données qui serviront de base à la comparaison sont issues du serveur de fiches géodésiques de l'IGN[3] (Figure 5.14). Une distinction qualitative est à faire concernant les données ponctuelles XYZ issues de cette base, entre :

- Les **repères de nivellement**, qui ont une résolution XY très faible avec des valeurs exprimées en kilomètres à seulement deux décimales (*i.e.* arrondies au décamètre) et des valeurs Z très précises, exprimées en mètres avec trois décimales (précision millimétrique) ;
- Les **repères du réseau géodésique** de détail qui ont une résolution XYZ centimétrique avec une précision généralement de l'ordre de 10 cm en planimétrie et 50 cm en altimétrie ;
- Les **repères du réseau géodésique de base**, qui affichent une résolution millimétrique en XYZ avec une précision planimétrique inférieure à 10 cm et altimétrique inférieure à 10 mm et il s'agit du référentiel le plus fiable de l'IGN qui soit mis à disposition.

Les repères de nivellement ont pour caractéristique d'être rarement situés au niveau du sol, mais préférentiellement sur des murs ou des monuments ce qui rend l'utilisation du Z compromise. Au vu de la résolution décamétrique en XY, l'analyse comparative avec des rasters de résolution 1 m apparaîtrait peu pertinente. Bien que les repères du réseau géodésique soient parfois également sur des bâtiments ou en haut de monuments (flèches d'églises, château d'eau, etc.), certaines bornes situées au sol apparaissent pertinentes et exploitables dans le cadre de cette analyse. Le choix a donc été fait de ne conserver que les repères du réseau géodésique de détail et de base situés au niveau du sol.

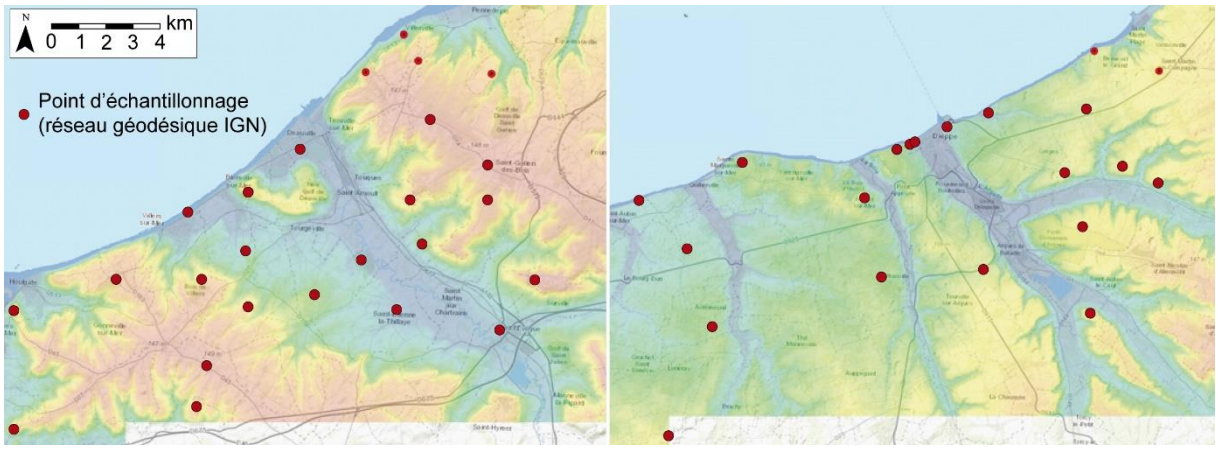


Figure 5.14 : Réseaux géodésiques sur le site d'étude n°1 (Houlgate à Honfleur) et n°2 (Quiberville à Dieppe)

Pour l'ensemble des jeux de données, il a été constaté que les valeurs des MNT sont très souvent situées en dessous des points géodésiques de l'IGN. Cette tendance s'explique par : (1) un filtrage un peu trop marqué de la végétation et des bâtiments par l'IGN générant de petits affaissements topographiques du MNT nettoyé. Les points IGN situés à proximité d'un bosquet, d'une forêt ou d'un bâtiment quelconque pourraient donc être affectés d'une valeur sous-estimée ; (2) des points géodésiques IGN situés sur des bornes en granit de petite taille, mais

[3] *Disponible sur https://geodesie.ign.fr/*

pouvant être suffisantes à générer de légère surestimation d'altitude de l'ordre d'un à deux décimètres. Pour la donnée Litto3D®, la résolution d'origine présente l'écart-type le plus faible (0,327 m). L'écart-type après rééchantillonnage à 5 m coïncide peu ou prou avec les valeurs des points issus du RGE Alti® sur l'emprise de la zone Lidar (dans une bande littorale de 2 km), ce qui confirme que la technique de rééchantillonnage utilisée donne des résultats proches de ceux de l'IGN à cette résolution (à 5 cm près). Le MNT Litto3D® 1 m voit son écart-type accroître de façon exponentielle à mesure que l'on diminue sa résolution, au point de devenir moins précise que la BD Alti® dès une résolution de 10m.

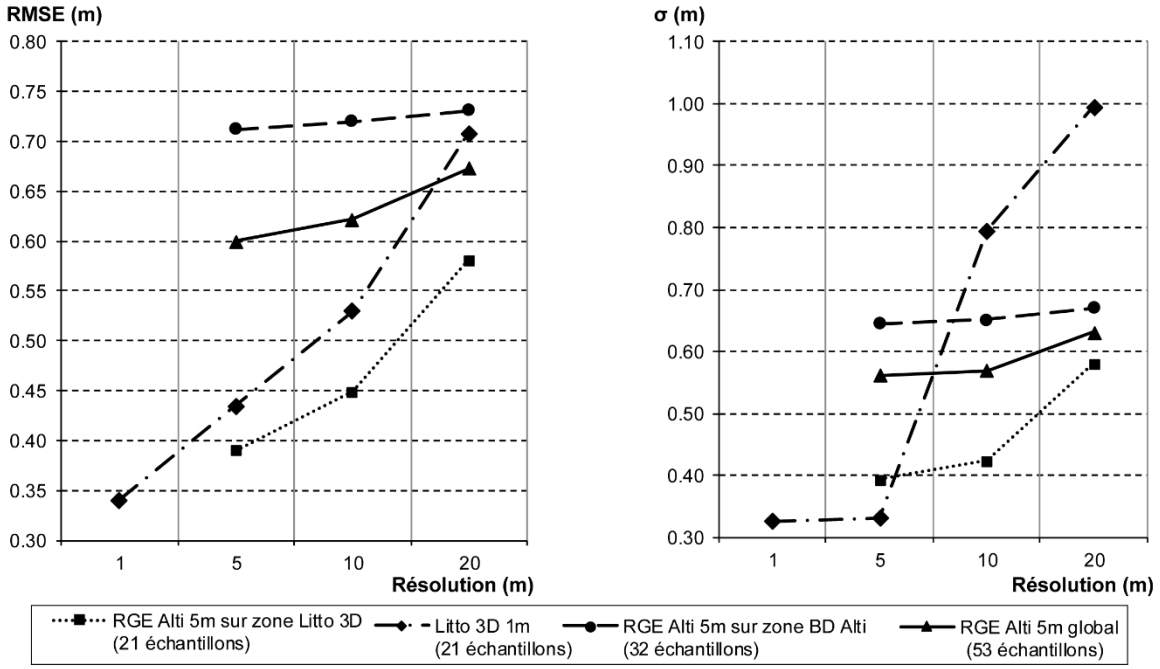


Figure 5.15 : Marges d'erreur des MNT par caractérisation de l'écart type et du RMSE

Le RGE Alti® connaît une variation plus modérée de son écart-type à mesure que l'on abaisse sa résolution, passant de 0,56 m dans sa résolution d'origine, à 0,57 m à un pas de 10 m puis à 0,63 m à un pas de 20 m. La tendance est identique pour le RGE Alti® entre l'analyse par écart-type et par RMSE, ce qui exprime une certaine stabilité de la distribution à mesure que la maille est dégradée. À nouveau, ce meilleur comportement du RGE Alti® au rééchantillonnage est lié à la résolution initiale à 25 m de la BD Alti®, puisque l'on constate un accroissement plus important de la RMSE en bordure littorale qu'en secteur continental, avec une augmentation non négligeable entre les résolutions 10 et 20 m (RMSE passant de 0,45 à 0,58 m).

5.2.2.3. Choix et résolution des MNT utilisés dans la modélisation

Il s'avère que si la dégradation visuelle est nette entre les résolutions 1, 5, 10 et 20 m, l'analyse des marges d'erreur par caractérisation de l'écart-type et du RMSE ne montre pas d'accroissement majeur de la marge d'erreur du RGE Alti®. À l'inverse, la donnée Litto3D® originale se dégrade plus rapidement que le RGE Alti® lors du rééchantillonnage, sa précision initiale étant meilleure. L'apparition de valeurs aberrantes en lien avec le rééchantillonnage de la donnée Litto3D®, contrairement à la donnée RGE Alti® dont les valeurs, bien que moins précises, semblent plus stables lorsqu'elles sont dégradées.

Un accroissement plus important de la marge d'erreur est constaté pour les points du RGE Alti® situés sur la bande littorale de 2 km couverte par la donnée Litto3D®. Sur ce secteur entre : (1)

les résolutions 5 et 10 m, la marge d'erreur s'accroît de 7 % pour l'écart-type contre 14 % pour la RMSE ; (2) entre les résolutions 10 et 20 m, la marge d'erreur augmente de 36 % pour l'écart-type et 29% pour la RMSE, ce qui traduit une perte non négligeable de précision du MNT. La donnée rééchantillonnée à un pas de 20 m amène une trop grande perte d'information pour pouvoir être considérée comme fiable. Dans le cas présent, le choix de résolution doit permettre de bénéficier d'une maille très fine des MNT sur les sorties cartographiques aux échelles définies. Au-delà de la conservation de l'intégrité statistique et graphique des données, nous cherchons ainsi à éviter un rendu pixellisé sur les exports. Valenzuela et Baumgardner (1990), estiment qu'un pixel devrait avoir une taille supérieure à 0,5 mm pour être visible sur papier. Vink (1975) définit quant à lui la plus petite résolution lisible (MLA ou Maximum Location Accuracy) comme étant comprise entre 0,1 et 0,25 mm. Hengl (2006) propose de définir la MLA par l'équation suivante :

$$[1] \quad p \leq \sqrt{\frac{MLD}{4}} = \sqrt{\frac{SN^2.0{,}00025}{2}}$$

Où *MLD* est la taille minimale de pixel discernable sur le papier, *p* est la taille de pixel et *SN* l'échelle de travail. Hengl (2006) définit ainsi la limite maximale de visibilité d'un pixel sur une carte par le quotient de l'échelle souhaitée par un facteur 0,00025. Au vu de ces travaux, il est préconisé d'utiliser les données suivantes à chacune des échelles de travail envisagées (Tableau 5.2) :

Tableau 5.2. MNT préconisés aux différentes échelles d'analyses spatiales

Échelle	MLA	Résolution	Taille de pixel	MNT	Traitement
1 : 2 000e	1,25 m	1 m	0,2 mm	Litto3D®/ RGE Alti®	Aucun (donnée de base)
1 : 10 000e	2,5 m	5 m	0,5 mm	RGE Alti®	Aucun
1 : 25 000e	6,25 m	10 m	0,4 mm	RGE Alti®	Rééchantillonnage bilinéaire

Les basses vallées de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle possèdent des échelles d'analyses spatiales comprises entre 1 : 10 000ème et 1 : 25 000ème et le RGE Alti® rééchantillonné à 5 m est donc le plus adapté pour la modélisation hydraulique. L'ensemble du paramétrage des modèles repose donc, dans la suite de ce chapitre, exclusivement sur ce modèle numérique.

5.2.3. Inondations intégrées à la modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique sous HEC RAS a été appliquée aux basses vallées de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle, sur la base du modèle numérique RGE alti® rééchantillonné à 5 m et pour des tempêtes coïncidant avec des débordements de cours d'eau. Pour chacune des basses vallées, nous avons sélectionné une tempête coïncidant avec les plus hautes lames d'eau afin de modéliser les débordements, durant cet événement, avec et sans blocage des écoulements par la mer. La situation avec blocage correspond alors aux observations et une situation sans blocage correspondrait à ce qui aurait dû se produire s'il n'y avait pas eu de tempête (prédiction).

La section 5.2.3.1 décrit l'inondation coïncidant avec la tempête Eleanor sur la basse vallée de La Touques les 3 et 4 janvier 2018. La section 5.2.3.2 décrit les inondations coïncidant avec la tempête Lothar et Martin sur les basses vallées du Dun, de L'Yères et de La Bresle les 26 et 27 décembre 1999.

5.2.3.1. Débordements de cours d'eau en lien avec la tempête Eleanor les 3 et 4 janvier 2018

La tempête Eleanor s'est produite le 3 et 4 janvier 2018 et est associée à une dépression de 969 hPa circulant du Royaume-Uni jusque dans la Mer du Nord (Fiches tempêtes Météo France[4] - Figure 5.41). Les plus fortes rafales de vent sont issues d'un front froid ayant atteint 120 à 140 km.h^{-1} sur le littoral en Manche. Les faibles pressions atmosphériques sont conjointes à de fortes vagues, en raison des flux nord-ouest, ainsi qu'à des coefficients de marée 107 et des hauteurs d'eau en mer de 8,70 m (ZH)[5].

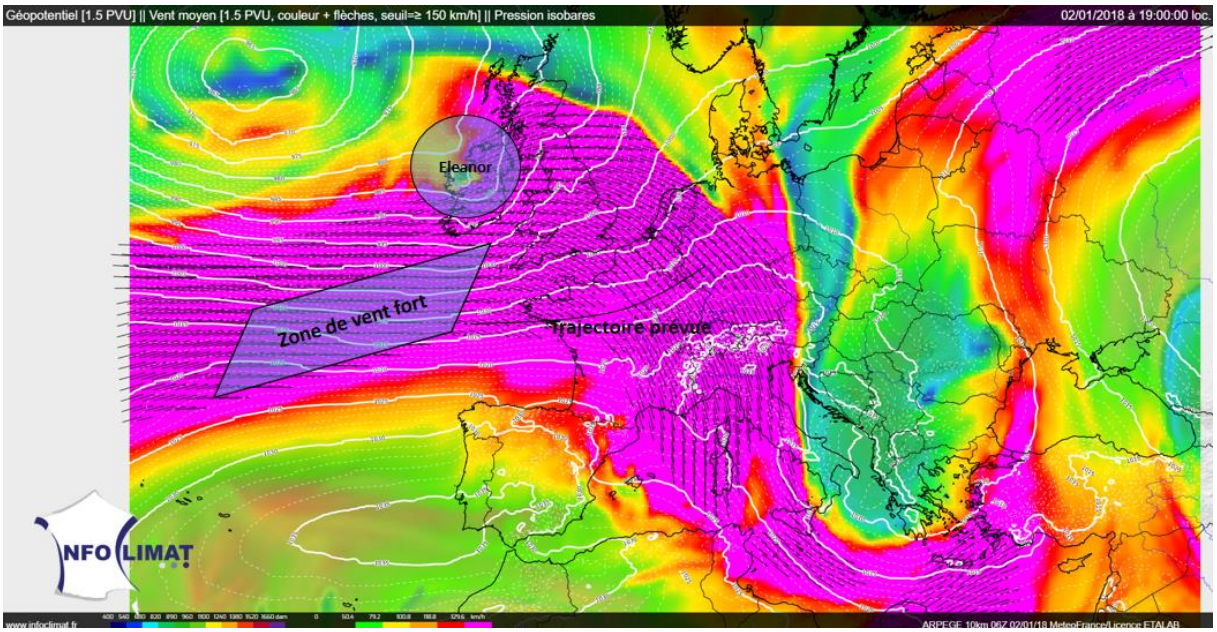


Figure 5.16 : Trajectoire de la tempête Eleanor les 3 et 4 janvier 2018 (issu d'Info climat, 2018)

Cet épisode de tempête a particulièrement affecté la basse vallée de La Touques en raison de forts coefficients de marée s'étant étalés sur plusieurs jours et coïncidant avec d'importantes hauteurs d'eau en mer. Le revif a commencé le 27 décembre 2017 avec un coefficient de marée de 47 et le déchet a commencé le 3 janvier 2018 avec un coefficient de 108 (GIP Seine-Aval, 2018). Les coefficients de marée durant les débordements de cours d'eau étaient supérieurs à 100 le 3 janvier et le pic de hauteur d'eau en mer a été atteint le 4 janvier avec une cote à 9,14 m à Honfleur. Les lames d'eau enregistrées sur La Touques, couplées à des surcotes de tempêtes, font de cet événement un des plus importants en termes de périodes de retours depuis les dernières décennies.

Les impacts de la tempête Eleanor ont surtout été ressentis dans le Calvados et moins en Seine-Maritime avec, par exemple, le débordement du port de Deauville et Trouville-sur-Mer (Figure 5.17). Des débordements de cours d'eau ont été ressentis sur les bassins du Dun, de L'Yères et de La Bresle, mais n'ont pas été aussi importants que ceux de la tempête Lothar et Martin les 26 et 27 décembre 1999.

[4] *Disponible sur http://tempetes.meteo.fr/*
[5] *Données disponibles sur https://maree.shom.fr/*

Figure 5.17 : Impact de la tempête Eleanor du 2 au 4 janvier 2018 en Manche

La lame d'eau et le débit maximum instantané ont été mesurés à Pont-L'Évêque, le 4 janvier 2018, avec respectivement 2,31 m et 53,7 $m^3.s^{-1}$ (Figure 5.18). Ces importantes lames d'eau ont engendré un débordement de La Touques dans toute sa basse vallée jusqu'aux alentours de la levée sur la RD 27 au nord de Deauville (Figure 5.4). Depuis Pont-l'Évêque jusqu'à la RD 27, la zone inondable est presque entièrement sous les eaux et les débordements, couplés à des submersions marines, ont nécessité l'évacuation de quelques habitations sur les communes littorales et communes arrière littorales (reportage B. Courret – France Bleu, 2018.) (Figure 5.19 – cliché B).

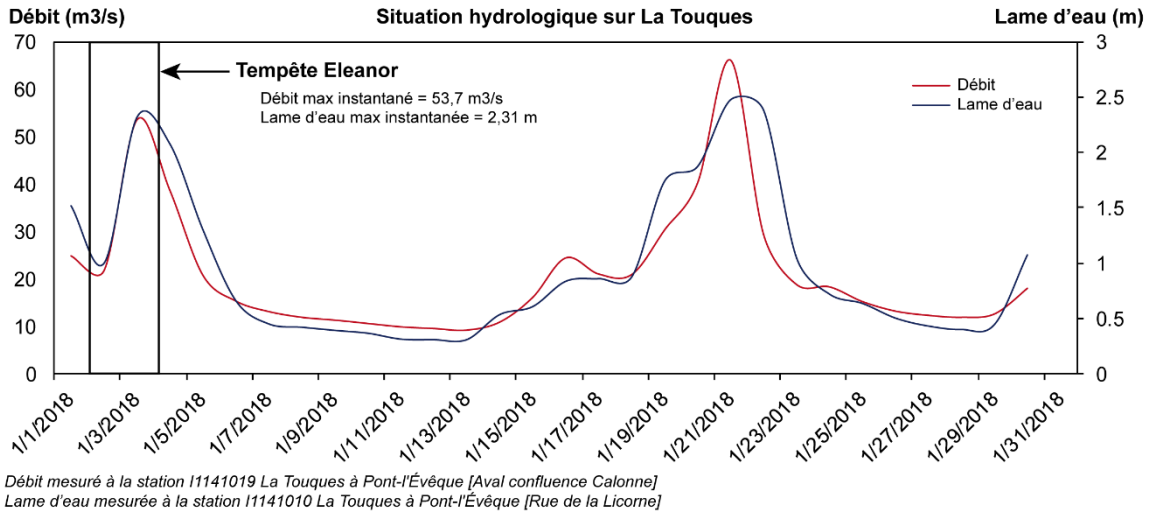


Figure 5.18 : Mesure des débits et des lames d'eau maximaux instantanés sur La Touques durant le mois de janvier 2018

Au-delà de la RD 27, c'est-à-dire à Deauville et Trouville-sur-Mer, les débordements de cours d'eau se sont produits juste en amont du port, vers le pont où circule la RD 513, ainsi que dans le port où les interactions entre submersions marines et les débordements étaient les plus fortes Figure 5.19 – cliché A).

Figure 5.19 : Débordements de cours d'eau après le passage de la tempête Eleanor le 4 janvier 2018

Dans la modélisation hydraulique mise en place sous HEC RAS, les débordements décrits précédemment correspondent à la « situation avec blocage des écoulements par la mer » (**observation**). Grâce aux analyses statistiques réalisées dans le chapitre 4, nous avons pu calculer les lames d'eau excédentaire issue du blocage des écoulements par la mer à la station de Pont-L'Évêque. Le blocage aurait ainsi engendré 8,1 cm de lame d'eau excédentaire soit environ 3 % de la lame d'eau totale observée (cf. 4.4.2.2 – Tableau 4.18). Nous allons donc rejouer cet événement en enlevant la lame d'eau excédentaire dans la modélisation ce qui correspond à la « situation sans blocage des écoulements par la mer » (**prédiction**).

5.2.3.2. Débordements de cours d'eau en lien avec la tempête Lothar et Martin les 26 et 27 décembre 1999

Les deux tempêtes Lothar et Martin sont issues de flux d'ouest très rapides et perturbés accentués par de fortes dépressions tempétueuses de l'ordre de 960 hPa au centre des tempêtes (fiches tempêtes Météo France, 2018). Ces dépressions exceptionnelles sont marquées par une force du vent allant jusqu'à 119 km.h^{-1} à Caen et une moyenne de 100 km.h^{-1} sur l'ensemble de la Manche (Figure 5.20).

Les précipitations durant les tempêtes Lothar et Martin ne sont pas exceptionnelles, de l'ordre de 5 à 15 mm entre le 26 et 27 décembre 1999, mais s'inscrivent dans un contexte de fortes précipitations. Des passages pluvieux surviennent chaque jour, sur les côtes normandes, depuis le début du mois de décembre. Si les précipitations durant la tempête ne sont pas exceptionnelles, ce sont les cumuls de précipitations qui le deviennent rendant les sols complètement saturés et propices à des débordements de cours d'eau. Le cumul de précipitations est de l'ordre de 50 à 60 mm entre le 23 décembre 1999 et le 30 décembre 1999 équivalent à plus d'un mois de cumul en Normandie survenue en une semaine.

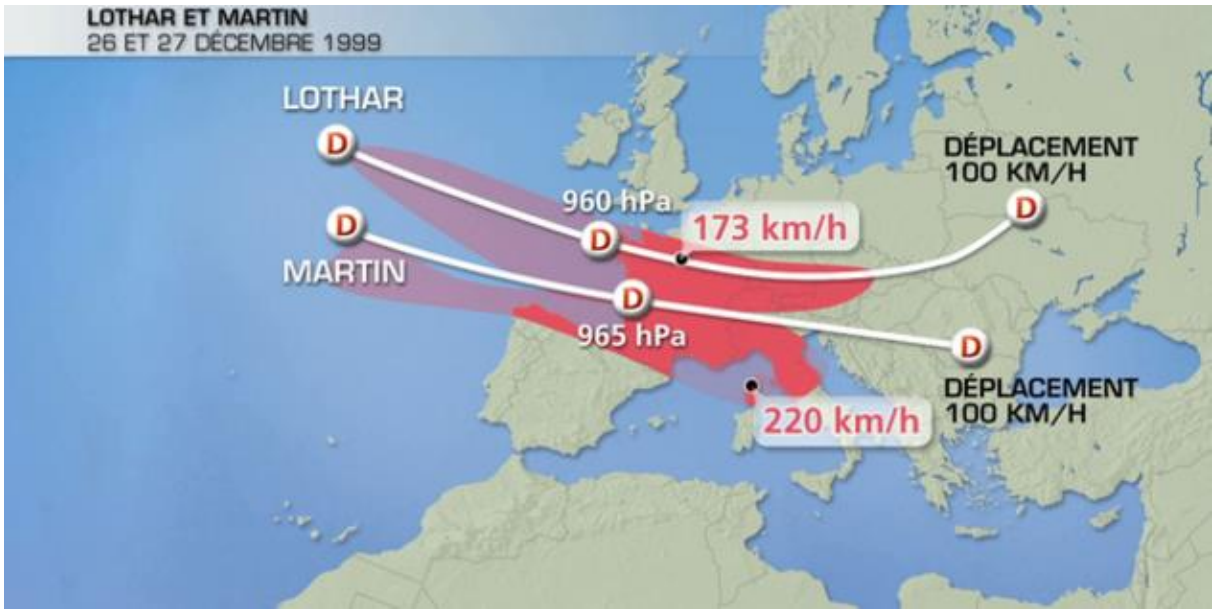


Figure 5.20 : Déplacement des tempêtes Lothar et Martin les 26 et 27 décembre 1999 (issue de La Chaine Météo, 2017)

La conjonction de basses pressions atmosphériques (960 – 970 hPa), accentuées par d'importants flux d'ouest ont provoqué une surcote comprise entre 70 cm et 1 m en Manche. Ces conditions ont entraîné une forte houle avec des hauteurs de vagues moyennes d'environ 4 à 6 m et au maximum les vagues ont atteint 8 m de hauteur. Cette situation de forte marée (coefficient de marée : 100 en Manche) dure plusieurs jours avec le passage successif de la tempête Martin le 27 décembre. Si des submersions marines se sont produites, notamment sur la Côte d'Albâtre, les pleines mers de vives-eaux sont déphasées des surcotes maximales atteintes. Cet événement aurait pu alors avoir beaucoup plus d'ampleur en termes d'impact (submersions marines, débordements de cours d'eau, etc.), si les surcotes maximales avaient été atteintes en même temps que les plus hautes marées (Letortu *et al.*, 2012).

Ces tempêtes sont conjointes aux plus forts débordements de cours d'eau dans l'ensemble des basses vallées littorales de Seine-Maritime[6]. Sur la basse vallée du Dun, la lame d'eau et le débit maximal instantané mesuré à Bourg-Dun ont été respectivement de 1,04 m et de 8,25 $m^3.s^{-1}$ le 26 décembre 1999 (tempête Lothar) correspondant à la « situation avec un blocage des écoulements par la mer » (**observation**) (Figure 5.21). Les rapports mentionnent que durant ces débordements, l'ensemble de la basse vallée du Dun est inondé avec des lames d'eau moyennes de 1 m sur une grande partie des terrains et localement les lames d'eau ont atteint jusqu'à environ 2 m (DDTM, 2010).

Les analyses statistiques réalisées dans le chapitre 4 n'ont pu être réalisées pour les tempêtes Lothar et Martin en raison d'une absence de données des hauteurs d'eau observées en mer par le marégraphe de Dieppe. Afin de pallier ce manque, nous avons utilisé les moyennes de lame d'eau excédentaires calculées pour les dates auxquelles nous avions des données observées en mer (cf. section 4.4.1 – figure 4.45). Ces lames d'eau moyennes sont de l'ordre de 4 cm représentant environ 15 % de la lame d'eau totale. Nous allons donc recréer la situation du 26 décembre 1999 en enlevant 15 % de la lame d'eau à la station hydrologique du Bourg-Dun afin d'obtenir une « situation sans un blocage des écoulements par la mer » (**prédiction**).

[6] *Issu des informations disponibles sur https://www.vigicrues.gouv.fr/*

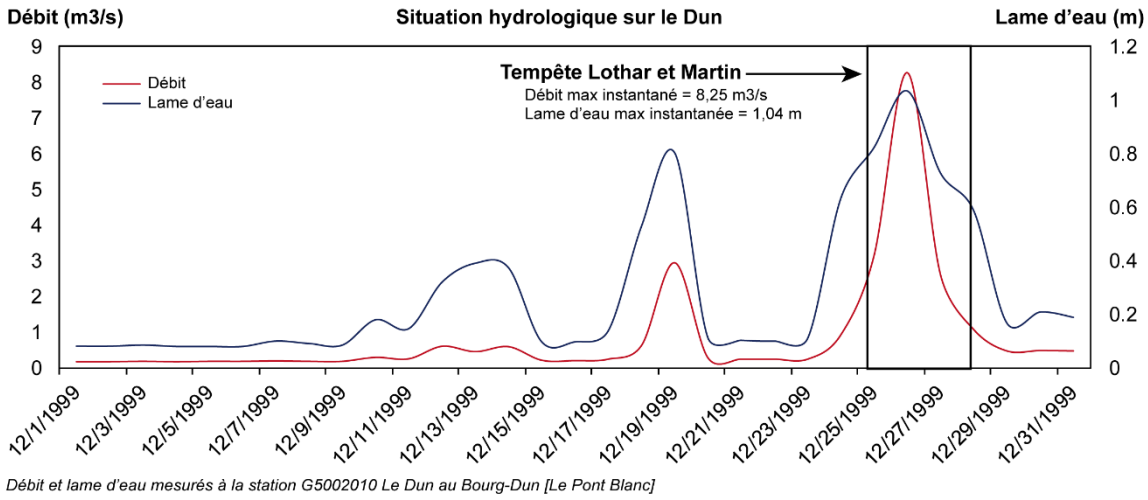


Figure 5.21 : Mesure des débits et des lames d'eau maximaux instantanés sur Le Dun durant le mois de décembre 1999

Sur la basse vallée de L'Yères, la lame d'eau et débits maximaux instantanés mesurés à la station de Touffreville-sur-Eu ont été de 1,09 m et de 9,96 $m^3.s^{-1}$ le 26 décembre 1999 durant la tempête Lothar (Figure 5.23) correspondant à la « situation avec blocage des écoulements par la mer » (**observation**). Les informations locales mentionnent que les lames d'eau ont atteint entre 50 cm et 80 cm dans le centre-ville de Criel-sur-Mer (Figure 5.22). En aval de Criel-sur-Mer et jusqu'à la digue de protection à la mer, les terrains sont laissés à un état naturel (parcelles du conservatoire du littoral) et une grande partie de la basse vallée était entièrement recouverte par les eaux.

Figure 5.22 : Débordement de L'Yères à Criel-sur-Mer le 26 décembre 1999 (clichés issus de la DDTM, 2016)

Nous ne possédons pas d'information sur les hauteurs d'eau observées en mer pour cette tempête et les analyses statistiques n'ont donc pas pu être réalisées pour cet événement en particulier. Comme pour la basse vallée du Dun, nous avons utilisé les moyennes de lame d'eau excédentaire calculée sur la basse vallée de L'Yères afin d'estimer l'effet de blocage des écoulements (*cf.* section 4.4.1 – figure 4.46). La lame d'eau excédentaire moyenne est d'environ 37 cm sur L'Yères correspondant à 33 % la lame d'eau totale. La « situation sans un blocage des écoulements par la mer » reproduira le débordement du 26 décembre 1999 avec 33 % de lame d'eau en moins par rapport à ce qui a pu être observé à la station hydrologique de Touffreville-sur-Eu (**prédiction**).

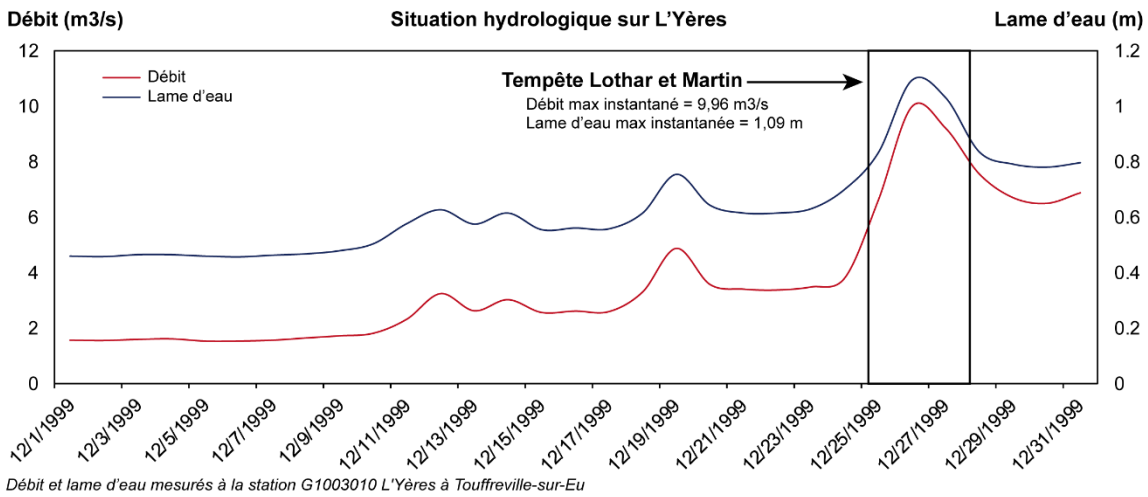


Figure 5.23 : Mesure des débits et des lames d'eau maximaux instantanés sur L'Yères durant le mois de décembre 1999

Sur la basse vallée de La Bresle, les plus hautes lames d'eau et débits maximaux instantanés ont été mesurés à la suite de la tempête Martin avec respectivement 1,04 m et 8,25 $m^3.s^{-1}$ le 27 décembre 1999 sur la station de Ponts-et-Marais (Figure 5.24). Ces informations sont utilisées pour la « situation avec un blocage des écoulements par la mer » dans la modélisation HEC RAS (**observation**). Ces débordements sont cependant restés concentrés dans les secteurs non urbanisés, c'est-à-dire dans la plaine inondable en amont de la commune d'Eu ainsi que de part et d'autre du canal de La Bresle et de l'ancien Canal de Penthièvre (DDTM, 2016).

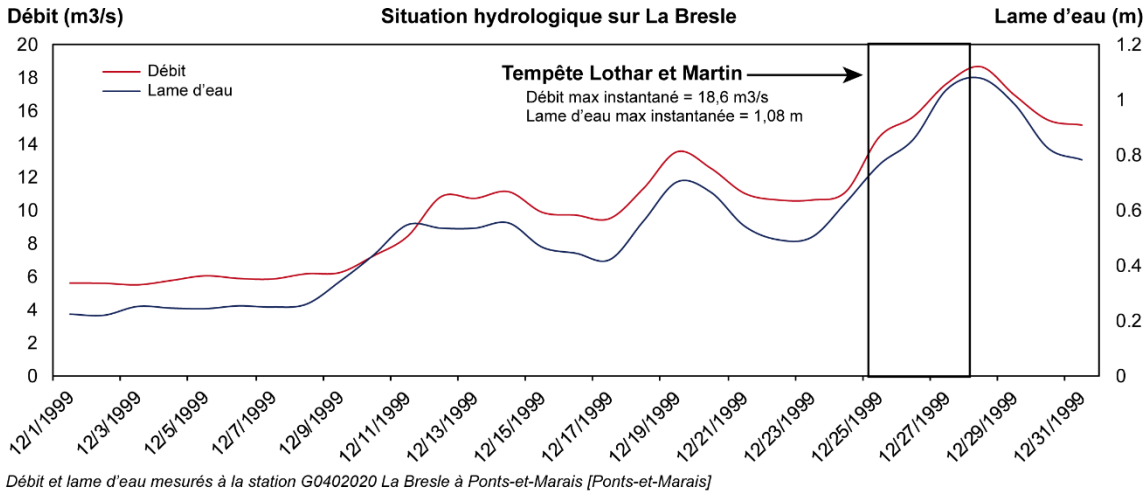


Figure 5.24 : Mesure du débit et de la lame d'eau maximum instantanés sur La Bresle durant le mois de décembre 1999

En l'absence de données de hauteurs d'eau observées en mer durant la tempête Martin, nous n'avons pas pu calculer les lames d'eau excédentaires pour cette tempête spécifiquement. Nous avons donc utilisé les moyennes calculées à l'embouchure de La Bresle (cf. section 4.4.1 – figure 4.47). Les lames excédentaires moyennes sont d'environ 25 cm et correspondent à 39 % de la lame d'eau totale observée. La « situation sans un blocage des écoulements par la mer » reproduira donc les débordements avec 39 % de lame d'eau en moins par rapport à ce qui a pu être observé durant la tempête Martin (**prédiction**).

5.2.4. Synthèse des basses vallées étudiées et des données intégrées à la modélisation

En conclusion de cette section, quatre basses vallées littorales sont retenues dans la modélisation et l'analyse des effets de blocage des écoulements par la mer : la basse vallée de La Touques, la basse vallée du Dun, la basse vallée de L'Yères et la basse vallée de La Bresle. Les données issues des modes d'occupation des sols vont servir à calculer les coefficients de rugosité nécessaires aux modélisations. Étant donné qu'il s'agit d'une modélisation hydraulique, nous allons également utiliser les informations recueillies sur les aménagements hydrauliques en intégrant les conduits, les digues, levées, zones de stockage des eaux, ainsi que les obstructions (habitations, industries, etc.).

Ces **aménagements hydrauliques** vont servir à « **contraindre** » **les cours d'eau** en imposant au modèle des secteurs devant être remplis avant de pouvoir en remplir de nouveau. En l'absence de ces contraintes, les basses vallées se rempliraient comme des cuvettes et les résultats des modèles s'éloigneraient grandement des observations. Les caractéristiques des basses vallées et leurs aménagements sont synthétisés ci-après (Tableau 5.3).

Tableau 5.3. Caractéristiques des basses vallées étudiées en termes de longueur, surface, d'occupation des sols et d'aménagements hydrauliques et tempête modélisée par basse vallée

Basse vallée	Longueur	Superficie	Occupation des sols	Aménagements hydrauliques	Tempête modélisée
La Touques	11,0 km	136 km²	- Zones urbaines éparses - Importante présence de bocage et prairies naturelles - Forte urbanisation à l'exutoire	- 1 large plaine inondable - 1 levée transversale (RD27) - Des berges artificielles et naturelles - 1 brise vague	Eleanor (3 et 4 janvier 2018)
Le Dun	2,3 km	7 km²	- Zones urbaines éparses - Faible urbanisation en aval - Prairie dans la vallée - Zone agricole sur le plateau et versant	- 1 plaine inondable (1,35 km de long) -1 levée (2 conduits) - 1 digue transversale (2 conduits)	Lothar (26 décembre 1999)
L'Yères	2,1 km	5 km²	- Prairies et absence d'urbanisation à l'exutoire (1 km) - Urbanisation moyenne en amont (Criel-sur-Mer) - Urbanisation et activité touristiques sur les versants	- Des berges artificielles et naturelles - 2 levées transversales (2 conduits) - 1 digue transversale (2 conduits)	Lothar (26 décembre 1999)
La Bresle	6,0 km	34 km²	- Très forte urbanisation à l'exutoire (Le Tréport et Mers-les-Bains) - Forte urbanisation en amont (Eu)	- 1 canal principal - 1 canal secondaire - 1 petite plaine inondable - 2 levées transversales - 1 clapet de régulation - 1 brise vague	Martin (27 décembre 1999)

La qualité de la modélisation hydraulique des basses vallées littorales est étroitement liée au modèle numérique de terrain employé. Le modèle numérique utilisé va dans ce cas dépendre en grande partie de l'échelle d'analyse spatiale considérée. Un modèle numérique trop précis pour de vastes surfaces a pour risque d'entraîner des erreurs durant la modélisation, mais également d'augmenter considérablement les temps de traitement. À l'inverse, un modèle numérique trop peu précis à une échelle locale risque de remplir le bassin comme une cuvette sans tenir compte des effets de site. Au regard des marges d'erreur et de l'écart-type définis sur les différents modèles et en les comparant à des points géodésiques, le RGE Alti® rééchantillonné à 5 m est le plus adapté pour les échelles d'analyses des basses vallées littorales (comprises entre le 1 : 10 000ème et le 1 : 25 000ème) et la modélisation hydraulique.

5.3. Mise en place de la modélisation hydraulique sous HEC RAS

La modélisation hydraulique s'effectue au sein d'un système permettant l'intégration : (1) de données vectorielles (occupations des sols, réseaux hydrographiques, aménagements hydrauliques) ; (2) de données rasters (MNT) et (3) de données attributaires (hydrogrammes, courbes de tarage, précipitation, etc.). L'intégration de ces données dans la modélisation hydraulique HEC RAS repose sur les équations fondamentales de l'hydrodynamisme déterminées par les équations de Navier- Stokes (Sampson *et al.*, 2015 ; Vargas *et al.*, 2019). Ainsi, l'objectif de la section 5.3 est de présenter le fonctionnement de la modélisation hydraulique, ainsi que le paramétrage nécessaire à son application aux basses vallées littorales de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle et pour la tempête Eleanor, la tempête Lothar et la tempête Martin.

La section 5.3.1 présente le fonctionnement global de la modélisation hydraulique, comprenant la résolution dynamique d'équations dans un espace en trois dimensions (dimension horizontale X, horizontale Y et verticale Z). La section 5.3.2 expose le paramétrage de la géométrie des basses vallées de La Touques, du Dun et de L'Yères et de La Bresle intégré à la modélisation HEC RAS.

5.3.1. Fonctionnement global de la modélisation hydraulique HEC RAS

Fonctionnant sur l'utilisation de profils en travers, deux modes de résolution dynamique d'équations sont utilisés dans la modélisation. La **loi de conservation de l'énergie** repose sur l'hypothèse qu'un débit entré en amont sera le même en aval, donnant ainsi lieu à des ajustements de la lame d'eau et des vitesses d'écoulement (section 5.3.1.1). Au sein d'un même profil, les **équations de Barré de Saint Venant (aux dérivées partielles)** sont utilisées pour permettre la modélisation des variations de débits et de hauteurs sur une distance horizontale *X* et une distance verticale *Y* dans un espace et un temps donné (section 5.3.1.2). La résolution de ces équations nécessite le **paramétrage de la géométrie des profils**, ainsi que de l'intégration de conditions limites et contraintes physiques pour chacun des profils (section 5.3.1.3).

5.3.1.1. Résolution dynamique des équations de conservation de l'énergie

La modélisation HEC RAS repose sur l'élaboration de profils sur lesquels sont déterminés un certain nombre de paramètres et de conditions limites pour reproduire les flux liquides dans un espace géographique en deux dimensions (Ochoa *et al.*, 2016 ; Vargas *et al.*, 2019). Le lien entre les flux liquides et les différents profils (issu du modèle numérique de terrain RGE Alti®)

est basé sur la résolution dynamique de l'équation de conservation de l'énergie définie par Bernoulli (1738) [2], en considérant un écoulement incompressible et régulier et pour un cours d'eau permanent.

$$[2]\ \ Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$[3]\ \ \alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \ldots + Q_n V_n^2]}{Q\overline{V^2}}$$

Où Z_1 et Z_2 sont les élévations du chenal principal, Y_1 et Y_2 sont relatifs à la profondeur de la colonne d'eau, V_1 et V_2 sont la vélocité moyenne des écoulements, α_1 et α_2 sont les coefficients de vélocité pondérés et déterminés par l'équation [3], g est l'accélération de la pesanteur, h_e correspond à la perte d'énergie, Q_n et V_n sont les taux de débit et la vélocité à chacune des sections en travers N (USACE, 2016).

La colonne d'eau de chaque section est déterminée par un processus itératif de système de résolution de deux équations [4] et [5] (Chaudhry, 2008).

$$[4]\ \ H_2 = H_1 - h_f$$

$$[5]\ \ H_2 = h_{vel} + h_{ele}$$

Où H_1 et H_2 correspondent à l'élévation totale à la section 1 et 2, h_f est relatif à la perte d'énergie, h_{vel} est la vitesse d'écoulement et h_{ele} est la hauteur d'écoulement. La perte d'énergie entre deux sections est déterminée à partir de l'équation [6].

$$[6]\ \ h_e = LS_f + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right|$$

Où L représente la longueur moyenne pondérée entre deux sections, S_f représente la friction de pente entre deux sections et C correspond au coefficient d'expansion ou de contraction du chenal (USACE, 2016).

Cette résolution dynamique de conservation de l'énergie permet d'indiquer le débit et/ou la lame d'eau en données d'entrée à chacun des profils en fonction des résultats des profils précédents. Au sein même des profils, ce sont les équations de Barré de Saint-Venant (1871) qui permettent aux modèles de répartir le débit et la lame d'eau au sein de l'espace.

5.3.1.2. Résolution dynamique des équations de Barré de Saint-Venant, validation des modèles et méthode de calcul des surfaces et volumes d'eau excédentaires

Dans un fonctionnement régulier des flux liquides, l'utilisateur entre des conditions limites à un débit en amont et en aval du cours d'eau à modéliser. Ces conditions limites peuvent prendre différentes formes comme la pente, une lame d'eau devant être atteinte, etc. En fonction des équations de conservation de l'énergie, le modèle calcule une lame d'eau, une vitesse d'écoulement et un débit à l'intérieur de l'espace de propagation ou de contraction des flux en l'adaptant à la géométrie du modèle. En cas d'absence d'information sur la lame d'eau ou le débit d'entrée ou de sortie, les pentes peuvent être spécifiées en conditions limites et en précisant le type d'écoulement (normal, critique ou subcritique). La propagation de ces flux au sein d'un profil se fait grâce à une résolution dynamique de l'équation 2-D de Barré de Saint-Venant (1871) dans lequel la distance horizontale en X est définie par l'équation [7].

$$[7]\ \frac{\partial u}{\partial t} + u\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + v\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -g\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) + v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - c_f u + fv$$

La distance verticale en Y est définie par l'équation [8].

$$[8]\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + v\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) = -g\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) + v_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - c_f v - fu$$

Où $\frac{\partial u}{\partial t}$ est une accélération locale des fluides, $u\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + v\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)$ est une accélération de l'advection, (*i.e.* quantité d'eau mise en mouvement sur une surface donnée et dans ce cas dans un système de projection en Lambert 93), $g\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)$ est un gradient de pression hydrostatique, $v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$ est la viscosité des fluides, $c_f u$ est la friction du lit, fv est le paramètre de Coriolis.

La lame d'eau est ainsi modélisée dans un espace ouvert sans contrainte à l'embouchure de la rivière.

Pour chacune des basses vallées, une validation des modèles hydrauliques est réalisée par comparaison des cotes NGF de la lame d'eau fournie par les services de l'État (PPR) ou, le cas échéant, grâce à des témoignages recueillis dans les archives indiquant les cotes de la lame d'eau pour certains bâtiments (repères de crue). La validation des modèles, pour chacune des basses vallées, est présentée plus spécifiquement dans la section des résultats (section 5.4).

L'effet de blocage des écoulements est alors défini par différence entre deux situations : une situation avec un blocage des écoulements par la mer et une situation sans un blocage des écoulements par la mer. La **situation avec un blocage des écoulements** par la mer correspond aux données acquises par la station hydrologique (**observation**) alors que la **situation sans blocage de l'écoulement** est **l'estimation** réalisée à partir des analyses statistiques (cf. chapitre 4). Dans le chapitre 4, nous avions appelé la lame d'eau excédentaire la lame d'eau issue du blocage des écoulements et se comprenait comme une valeur dans un repère au sein d'une seule dimension. Dans ce chapitre, nous travaillons dans un repère en trois dimensions et nous devons considérer en plus de la lame d'eau excédentaire, les surfaces d'eau excédentaires (*SEE*) ainsi que les volumes d'eau excédentaires (*VEE*). La surface [9] et le volume d'eau excédentaires [10] et [11] sont calculés grâce à une calculatrice raster fournie dans un environnement SIG.

$$[9]\quad SEE = Surface\ d'eau\ de\ la\ situation\ avec\ blocage - Surface\ d'eau\ de\ la\ situation\ sans\ blocage$$

$$[10]\ \ Volume\ d'eau = surface\ d'eau \times lame\ d'eau$$

$$[11]\ \ VEE = Volume\ d'eau\ de\ la\ situation\ avec\ blocage - volume\ d'eau\ de\ la\ situation\ sans\ blocage$$

Comme nous travaillons sur des données raster, ces formules sont calculées initialement à l'échelle d'un pixel (de 5 m de côté) et les valeurs de ces pixels sont ensuite totalisées pour obtenir la surface et le volume total d'eau excédentaire.

5.3.1.3. Implémentation des contraintes physiques

Comme vu dans la présentation des basses vallées étudiées (section 5.2.1), ces basses vallées sont fortement contraintes par les infrastructures hydrauliques, soit en amont de la basse vallée, soit en aval, selon le mode gestion retenus par les acteurs et collectivités locales. Dans ce contexte, il est essentiel de considérer l'ensemble des aménagements hydrauliques dans la modélisation afin de ne pas surestimer l'impact des débordements de cours d'eau et proposer une cartographie cohérente de ce qui a pu probablement se produire dans les basses vallées. Ces aménagements servent également à contraindre la modélisation afin que les profils ne se remplissent pas à la manière de cuvette.

Le modèle HEC RAS propose un système d'intégration des contraintes physiques naturelles (e.g. bassins de rétention des eaux, levées naturelles, etc.) et artificielles (e.g. digues, levées artificielles, barrages, ponts, conduits, etc.). Ces contraintes physiques doivent être intégrées individuellement sur chacun des profils (Figure 5.25).

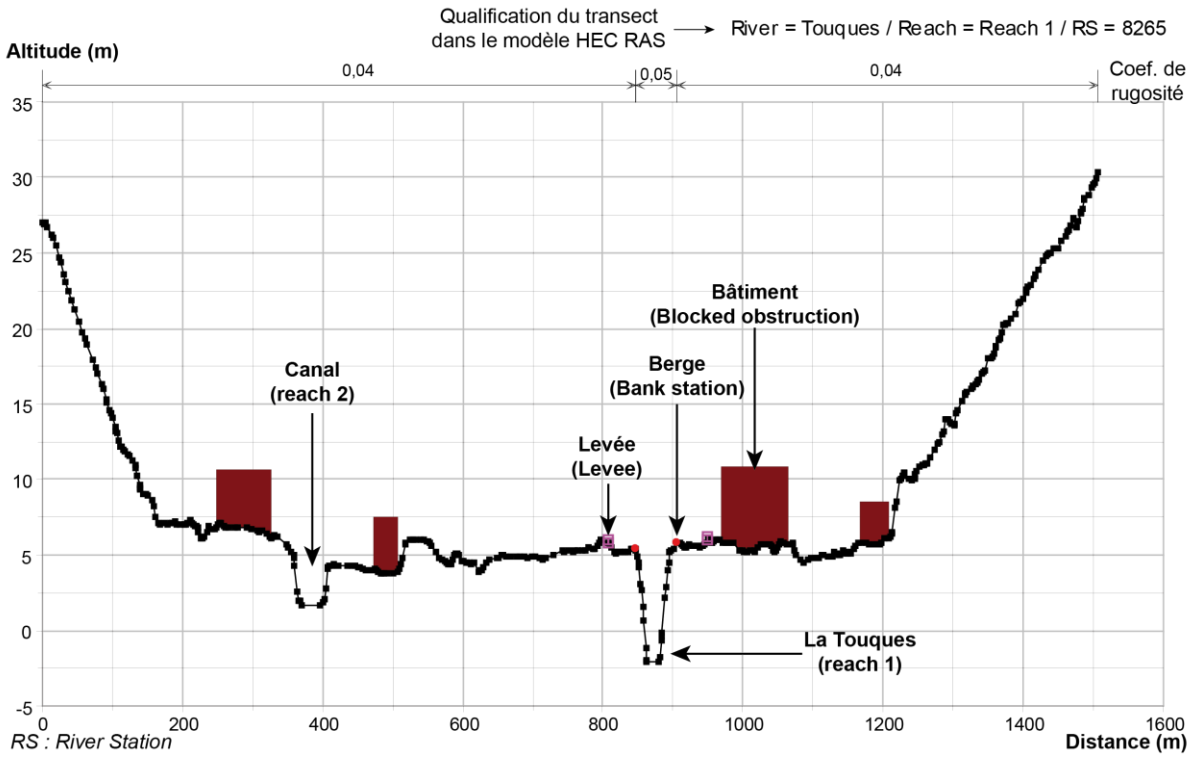


Figure 5.25 : Exemple d'intégration des contraintes physiques dans le paramétrage de la géométrie d'une basse vallée (dans le cas de La Touques) sous HEC RAS

L'implémentation de berges dans les modélisations (Bank station) permet initialement de séparer le cours d'eau en trois parties : la rive gauche, le chenal et la rive droite. Le coefficient de rugosité de Manning *N* est alors intégré pour chacune de ces trois sections et dépend du mode d'occupation des sols définis dans la section 5.2.1. Les levées constituent le second élément à paramétrer dans la géométrie du modèle.

Sans les levées, la lame d'eau remplit le profil de la même façon qu'une bassine et représente la première contrainte physique de la modélisation. Les infrastructures telles que les bâtiments (résidentiels, industriels, ...), etc. (*i.e.* Blocked obstruction) permettent d'adapter les vitesses d'écoulement ainsi que les lames d'eau du cours d'eau. Les vitesses d'écoulement vont très fortement chuter au sein de ces infrastructures et fortement augmenter sur leur périmètre.

5.3.2. Paramétrage de la géométrie des modèles et des flux liquides (conditions limites d'écoulement)

La géométrie des basses vallées a été paramétrée grâce au RGE Alti (rééchantillonné à 5 m) pour La Touques, le Dun, L'Yères et La Bresle (section 5.3.2.1). A partir des profils réalisés comprenant les contraintes physiques (*cf.* précédemment), les indices de rugosité de Manning ont été calculés grâce aux modes d'occupation des sols (section 5.3.2.2).

5.3.2.1. Élaboration de profils d'amont en aval des bassins d'étude

Sur la basse vallée de La Touques, un unique drain a été modélisé (Reach 1) à partir des données hydrographiques fournies par la BD TOPO (données issues de l'IGN, 2017). Au total, 70 profils ont été intégrés d'amont en aval de la basse vallée avec une séparation moyenne de 200 m entre chacun des profils et recouvrent la plaine alluviale dans son intégralité (Figure 5.29). Cette basse vallée est spatialement la plus longue et le nombre important de profils à intégrer provient de l'importante sinuosité de La Touques dans sa plaine alluviale. Une des règles de la modélisation est que chaque profil doit traverser une unique fois un cours d'eau (reach : *x*). Les conditions limites du cours d'eau (*i.e.* Reach Boundary Conditions) ont été déterminées d'amont en aval *via* les coordonnées Delta fournies par le modèle (Figure 5.29 – [1] et [2]). La RS 11 000 (axe des abscisses du profil en long) marque la présence de la levée et le point de concentration des eaux de La Touques jusqu'au port Deauville et Trouville-sur-Mer (RS 0 à RS 4300). Le paramétrage de la géométrie des basses vallées du Dun (Figure 5.27), de L'Yères (Figure 5.28) et de La Bresle (Figure 5.29) ont été fait en suivant une même logique.

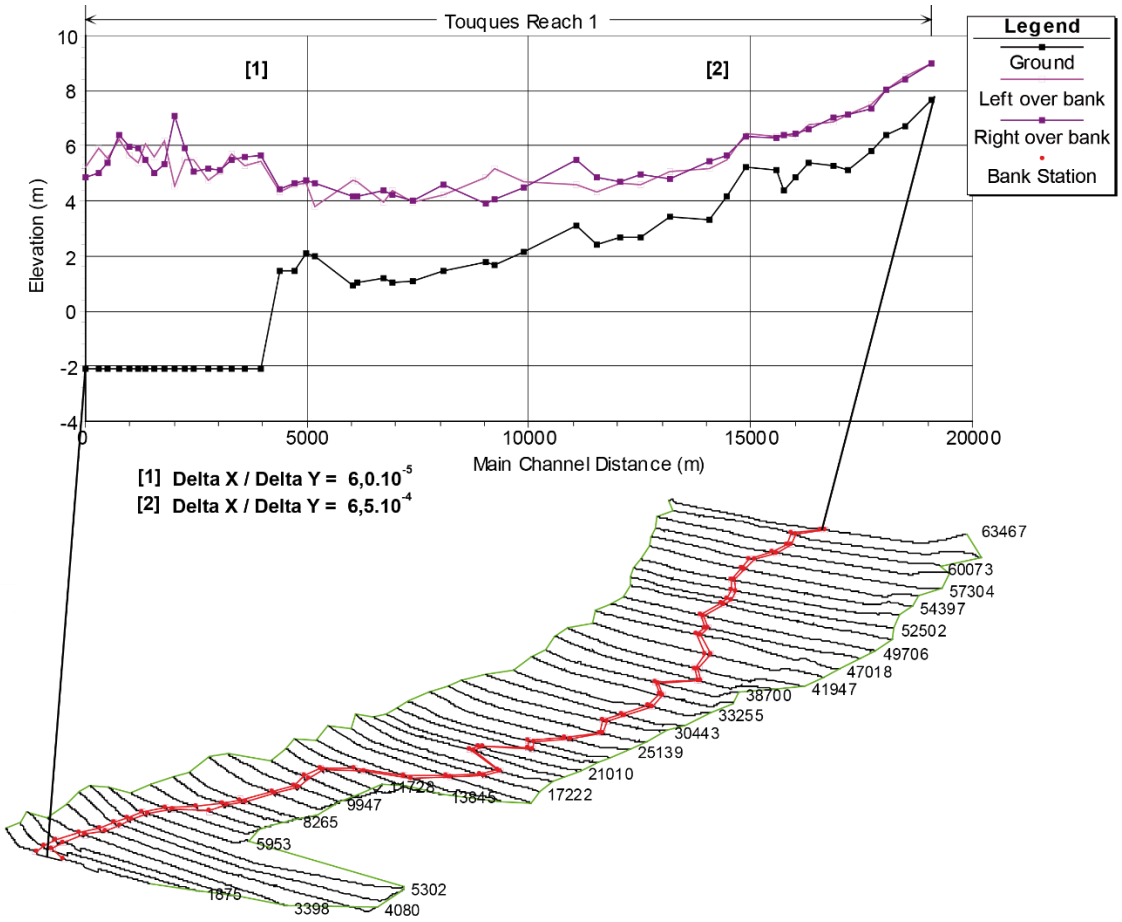


Figure 5.26 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée de La Touques

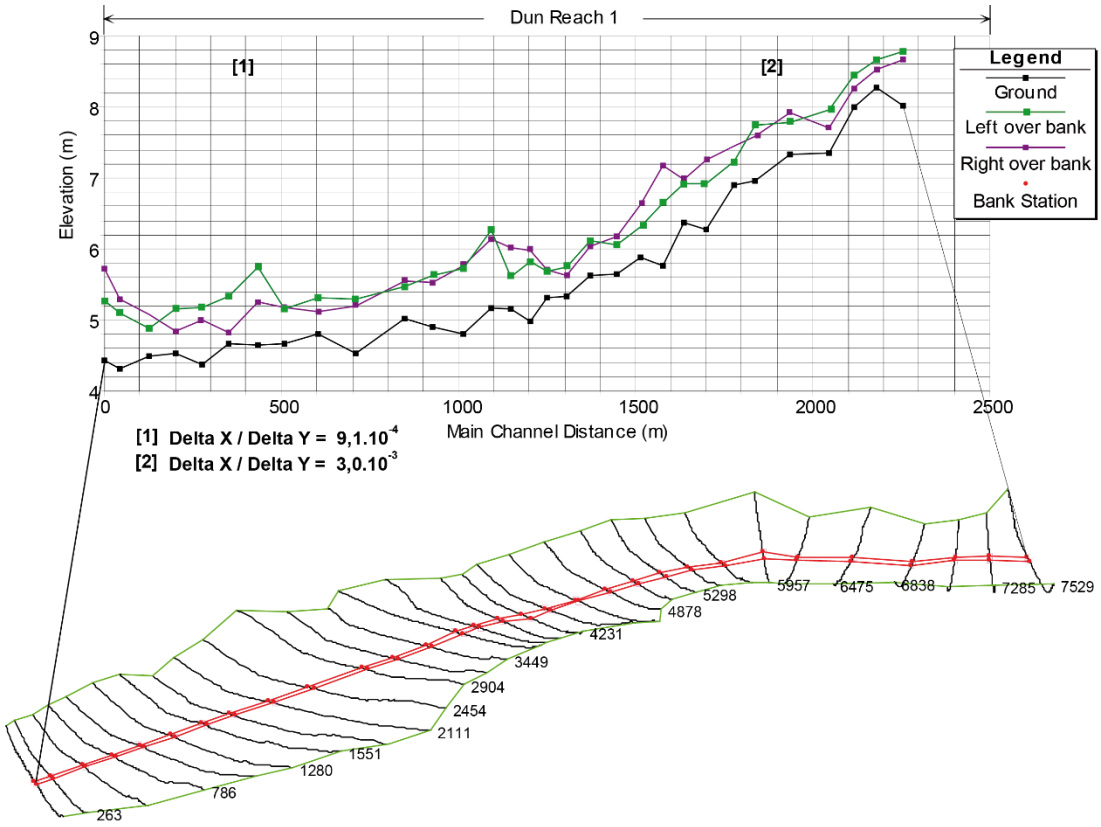


Figure 5.27 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée du Dun

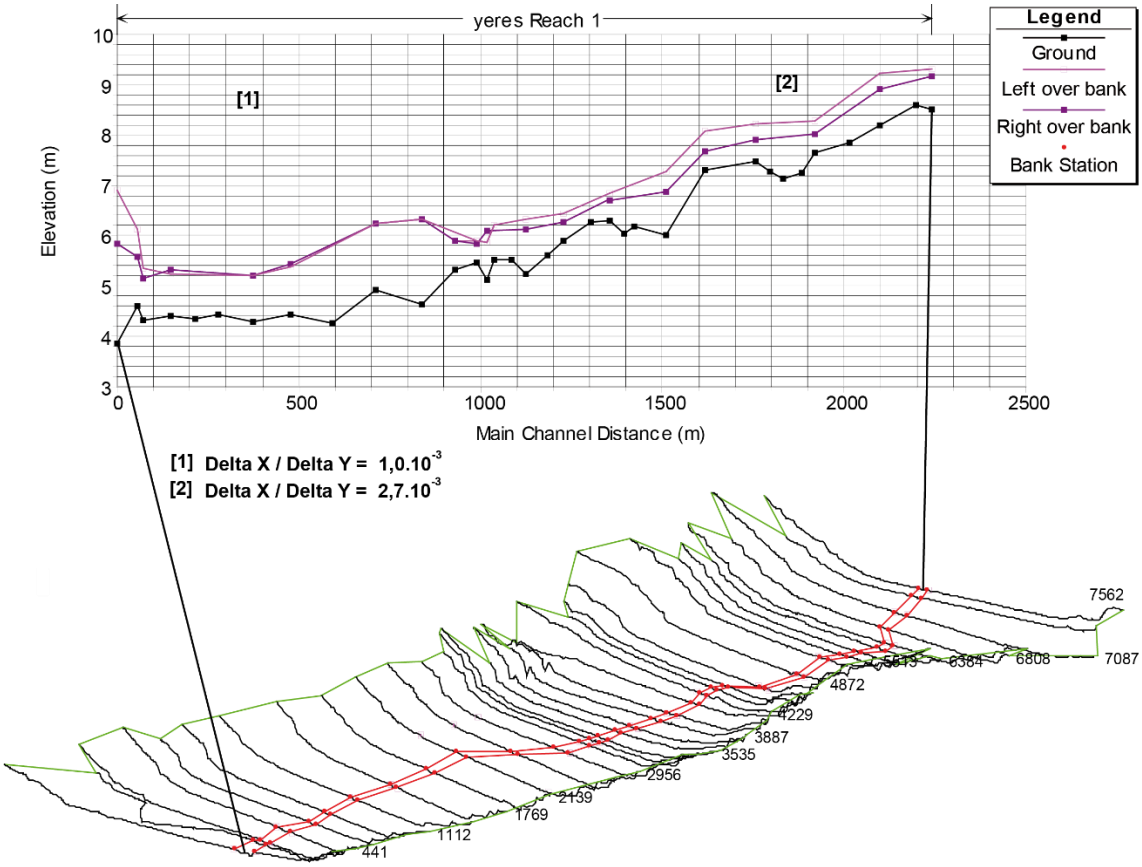


Figure 5.28 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée de L'Yères

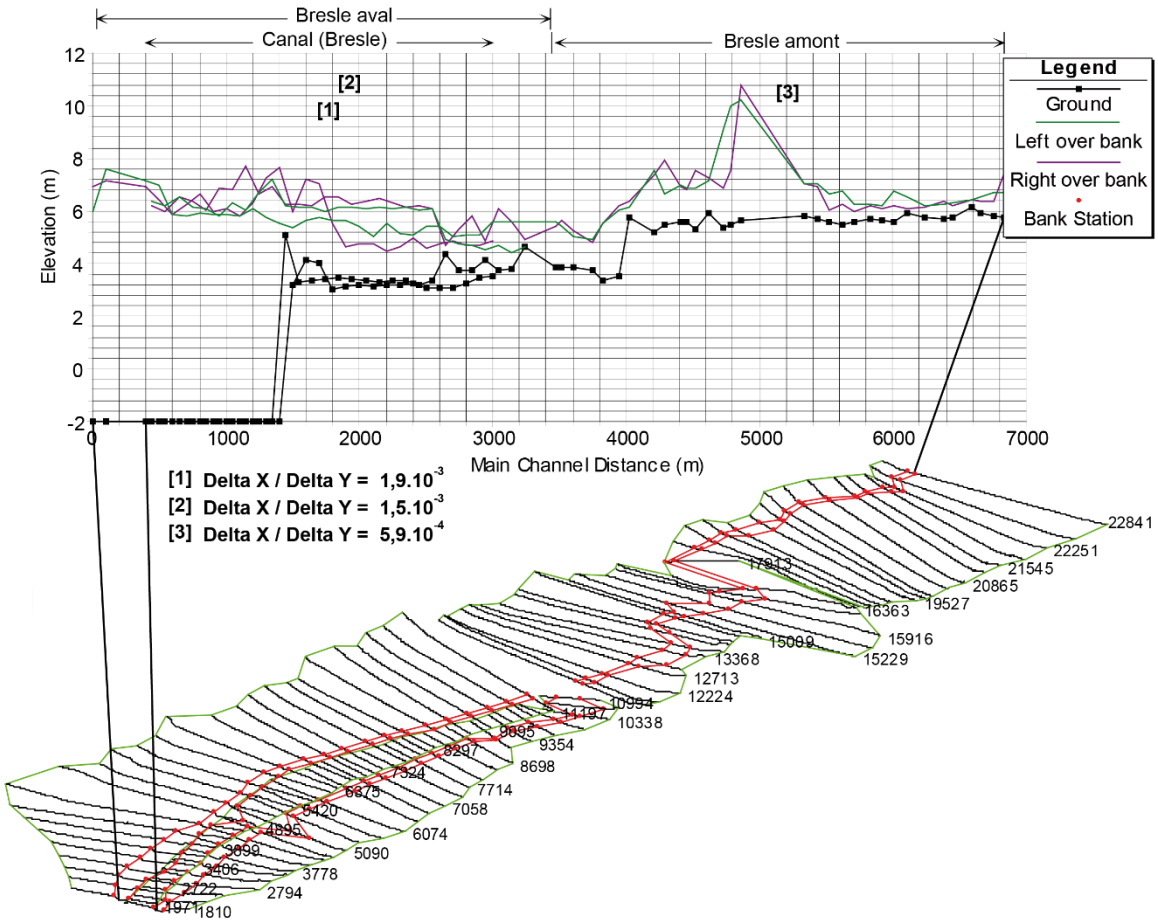


Figure 5.29 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée de La Bresle

Les basses vallées du Dun, ainsi que de L'Yères, présente des cours d'eau relativement rectilignes avec une géométrie assez simple. La distance entre les profils sur le Dun est moyenne de 60 à 70 m (Figure 5.27). La RS 1100 marque la présence de la levée (environ 1,5 m de haut) sur la RD 75 et l'implantation de deux conduits (1 m × 1 m chacun) dans la géométrie du modèle (*i.e.* Inline Structure). L'augmentation de la hauteur des berges (ainsi que des levées) de la RS 0 à la RS 150 correspond à la digue de protection à la mer, ainsi que la présence de deux conduits à l'exutoire (1 m × 1 m chacun).

Au total, 36 profils ont été réalisés dans la basse vallée de L'Yères avec une distance, entre les profils, moyenne de 60 m (Figure 5.28). Le cours d'eau est contraint latéralement par des levées artificielles en amont de la basse vallée (de la RS 1050 à la RS 2100). À l'exutoire de L'Yères, de la RS 0 à la RS 100, la digue de protection a été intégrée à la modélisation sous forme de levée comprenant deux conduits de 1 m × 1 m.

En raison de la présence de nombreux aménagements hydrauliques, la géométrie de la basse vallée de la Bresle a été une des plus complexes à modéliser. Au total, 87 profils ont été réalisés sur trois sections (Reach) différentes (Figure 5.29) : 32 profils en amont de la Bresle (Reach : 1 de la RS 6 900 à la RS 3 600), 27 profils en aval de la Bresle (Reach : 1-Lower de la RS 3 600 à la RS 0) et 28 profils depuis l'ancien canal de Penthièvre jusqu'à l'embouchure. Une levée d'environ 4 m, à la RS 5 000, marque la fin de la plaine inondable et l'entrée dans une zone entièrement urbanisée à Eu et au Tréport. Le clapet de régulation a été intégré sous la forme d'un unique conduit 1 m × 1 m.

5.3.2.2. Intégrations des indices de rugosité de Manning

Sur chacun des profils, différents coefficients de rugosité (*roughness coefficient*) ont dû être déterminés et une approche classique dans l'élaboration des modèles hydrauliques est de partir des modes d'occupation des sols (Dimitriadis *et al.*, 2016 ; Papaioannou *et al.*, 2018). Initialement, trois coefficients de rugosité peuvent être intégrés par profil et sont issus des valeurs classiquement utilisées dans la littérature (Aggett et Wilson, 2009 ; Bellos, 2012 ; Schubert et Sanders, 2012 ; Afshari *et al.*, 2018).

Ces coefficients de rugosité traduisent le comportement des fluides sur une surface matérielle solide et, plus spécifiquement en hydraulique, caractérisent les pertes de charge linéaires sur une surface libre. Les coefficients de Manning utilisés sont présentés dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4. Coefficient de rugosité de Manning appliqué selon les modes d'occupation des sols pour les différents profils (valeurs de coefficient issu de Papaioannou *et al.*, 2018)

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Manning (n)
1 Surface artificielle	1.1 Tissu urbain	1.1.1 Continu 1.1.2. Discontinu	0.013
	1.2 Industrie, commerce et transport	1.2.1 Industrie ou commerce 1.2.2 Routes et voies ferrées 1.2.3 Ports 1.2.4 Aéroports	0.013
	1.3 Mines, chantiers et décharges	1.3.1 Extraction matériaux 1.3.2 Décharge 1.3.3 Chantier	0.013
	1.4 Surface végétale artificielle	1.4.1 Espace vert urbain 1.4.2 Infrastructure de loisirs	0.025
2 Surfaces agricoles	2.1 Terres arables	2.1.1 Terres arables non irriguées 2.1.2 Terres arables irriguées	0.03
	2.2 Cultures permanentes	2.2.1 Vignoble 2.2.2 Arbres fruitiers 2.2.3 Oliveraie	0.08
	2.3 Prairie	2.2.1 Prairie	0.035
	2.4 Agriculture hétérogène	2.4.1 Culture annuelle 2.4.2 Systèmes complexes 2.4.3 Surfaces en gel 2.4.4 Agroforesterie	0.04 0.04 0.05 0.06
3 Forêt et milieu semi naturels	3.1 Forêts	3.1.1 Forêts de feuillus 3.1.2 Forêts de conifères 3.1.3 Forêts mixtes	0.1
	3.2 Surface en herbe et végétation basse	3.2.1 Praire naturelle 3.2.2 Landes 3.2.3 Végétation basse 3.2.4 Surface de transition	0.04 0.05 0.05 0.06
	3.3 Milieu ouvert	3.3.1 Plages, dunes et sable 3.3.2 Roche nue 3.3.3 Végétation éparse 3.3.4 Surface brûlée 3.3.5 Glacier et neige	0.025 0.035 0.027 0.025 0.01
4 Milieu humide	4.1 Zone humide continentale	4.1.1 Marais 4.1.2 Tourbière	0.04
	4.2 Zone humide maritime	4.2.1 Marais salant 4.2.2 Saline	0.04

		4.2.3 zone intertidale	
5 Surface en eau	5.1 Continental	5.1.1 Cours d'eau 5.1.2 Lacs	0.05
	5.2 Maritime	5.2.1 Lagons 5.2.2 Estuaires 5.2.3 Mers et océans	0.07

En cas d'intégration d'infrastructures, le coefficient de rugosité est automatiquement plus élevé afin de réduire grandement les vitesses d'écoulement des flux à l'intérieur de ces infrastructures et augmenter les vitesses sur le périmètre extérieur de la structure (Horritt et Bates, 2001 ; Schubert et Sanders, 2012 ; Bellos et Tsakiris, 2015 ; Afshari *et al.*, 2018).

5.3.3. Conclusion sur le paramétrage de la modélisation hydraulique

L'application de la modélisation hydraulique HEC RAS sur les basses vallées littorales de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle repose sur l'élaboration de profils déterminés grâce à un MNT (RGE Alti – 5 m). Pour chacune des basses vallées modélisées, la distance moyenne entre deux profils varie de 60 (L'Yères) à 200 m (La Touques) et couvre systématiquement l'intégralité de la plaine alluviale. Un mode d'écoulement permanent est utilisé pour cet environnement et repose sur la résolution dynamique des équations de conservation de l'énergie (inter-profils) et sur les équations 2D de Barré de Saint-Venant (intra-profil).

Une fois la géométrie des basses vallées paramétrée dans la modélisation hydraulique, nous avons utilisé les données de lame d'eau fournies par les documents d'urbanismes (PPR) afin de valider les modèles par comparaison avec la modélisation HEC RAS et les observations issues des services de l'État et calculer ainsi les marges d'erreur (éléments présentés dans les résultats). Une fois les modèles validés, nous avons modélisé deux situations pour chacune des basses vallées : (1) une « situation avec un blocage des écoulements par la mer » (valeurs observées) et (2) une « situation sans un blocage des écoulements par la mer » (valeurs prédites) (Tableau 5.5).

Tableau 5.5. Synthèse des données hydrologiques et conditions limites intégrées à la modélisation HEC RAS par basse vallée

			Situation avec blocage (observation)		**Situation sans blocage (prédiction)**	
Basse vallée	**Événement considéré**	**Conditions limites**	**Débit (m^3/s)**	**Lame d'eau (m)**	**Débit (m^3/s)**	**Lame d'eau (m)**
La Touques	Eleanor (3 et 4 janvier 2018)	$6{,}0.10^{-5}$	53,7	2,31	52,1	2,24
Le Dun	Lothar (26 décembre 1999)	$9{,}1.10^{-4}$	8,3	1,04	7,0	0,88
L'Yères	Lothar (26 décembre 1999)	$1{,}0.10^{-3}$	10,0	1,09	6,7	0,73
La Bresle	Martin (27 décembre 1999)	$1{,}9.10^{-3}$	18,6	1,08	11,3	0,66

Le calcul des **surfaces d'eau excédentaires** et des **volumes d'eau excédentaires** est obtenu par **différence entre les situations avec blocage et sans blocage** des écoulements par la mer. Cette différence est réalisée grâce à la calculatrice raster fournie dans un environnement SIG.

5.4. Résultats des modèles hydrauliques sur les situations avec et sans blocage des écoulements par la mer en période de tempête

Cette section présente les résultats des modèles reproduisant les situations avec et sans blocage des écoulements par la mer à l'échelle des basses vallées de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle. Les modèles ont été validés par comparaison des modèles hydrauliques avec les cotes NGF du plan d'eau fournies par les services de l'État grâce à une série de points de contrôle. Le cas échéant, les informations recueillies dans les archives départementales ont permis d'estimer les marges d'erreur sur les modèles. Une fois les marges d'erreur déterminées, les résultats des modélisations hydrauliques (situation avec un blocage et situation sans un blocage des écoulements par la mer) sont présentés successivement pour chacune des basses vallées de La Touques, du Dun, de l'Yères et de La Bresle (section 5.4.1 à section 5.4.4).

5.4.1. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée de La Touques

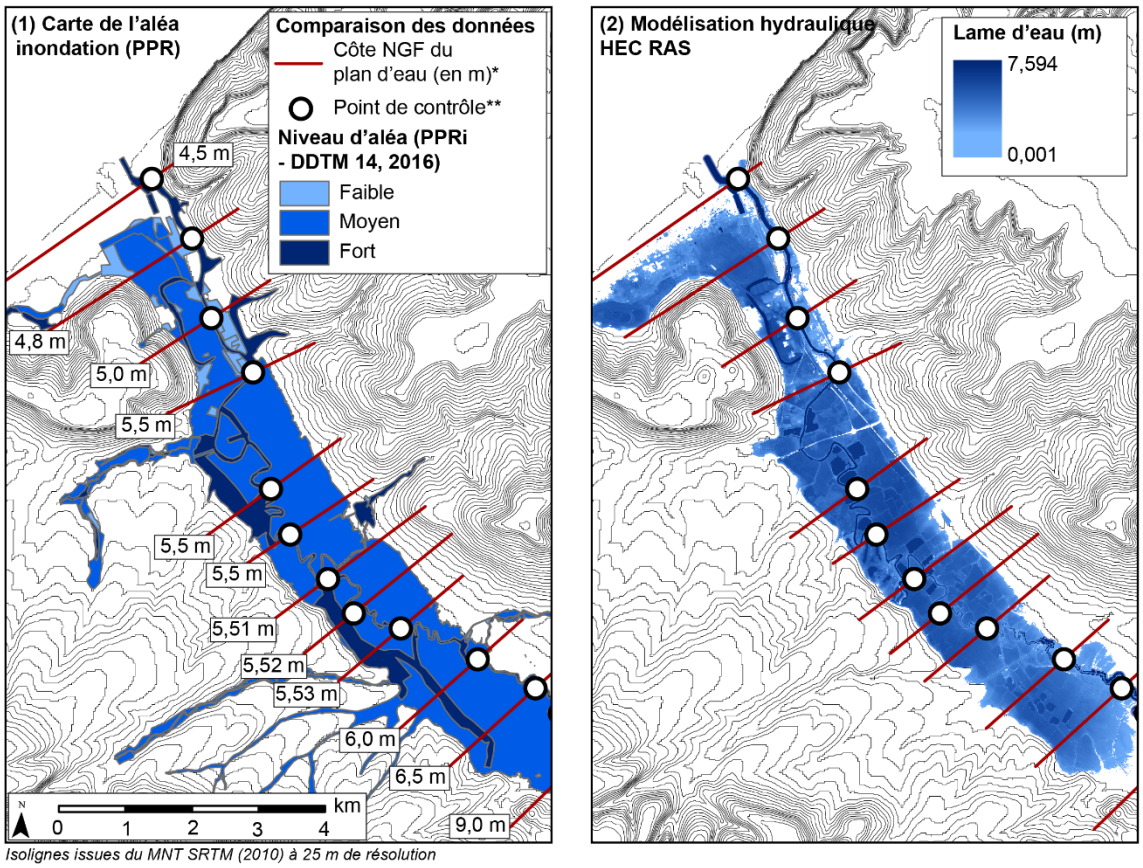
La section 5.4.1.1 présente une estimation des marges d'erreur à partir de la comparaison des résultats de la modélisation avec HEC RAS avec les cotes du plan d'eau NGF du PPRi élaboré à partir de la morphologie de la basse vallée et de plusieurs repères de crues. La section 5.4.1.2 expose et analyse les résultats des modèles hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Touques durant la tempête Eleanor des 3 et 4 janvier 2018.

5.4.1.1. Calcul des marges d'erreur de la modélisation hydraulique par comparaison avec les cotes NGF du PPRi

La validation de la modélisation de la basse vallée de La Touques, ou tout du moins l'estimation de la vraisemblance du comportement des flux liquides a nécessité une comparaison avec des valeurs mesurées (dans le meilleur des cas) ou calculées. En l'absence de crue de référence (période de retour centennale) observée, la DDTM[7] a estimé cette crue à partir d'une analyse hydrogéomorphologique (DDTM, 2016). En effet, l'évaluation de cette lame d'eau repose sur une analyse des lignes d'eau, des laisses de crue et d'une analyse topographique (levé Lidar). Les cotes NGF du plan d'eau ont ainsi été obtenues par interpolation de différents profils, de la cote du plan d'eau (à une altitude en mètre NGF) grâce à un MNT au sein d'un SIG et non à partir d'un logiciel de modélisation des flux (Figure 5.30 – (1)).

La lame d'eau déterminée dans le PPRi a été reconstituée en faisant la soustraction entre la cote NGF du plan d'eau et le point d'altitude bas du cours d'eau issu du modèle numérique de terrain sur 12 points de contrôle et correspond aux profils réalisés pour la crue de référence. Une lame d'eau de 1,70 m, en amont de la basse vallée, et de 6,50 m, à l'exutoire de La Touques, a ainsi été intégrée dans la modélisation HEC RAS pour reproduire le comportement hydrologique de La Touques durant cette crue de référence (Figure 5.30 – (2)).

[7] *Direction départementale des territoires et de la mer*



Isolignes issues du MNT SRTM (2010) à 25 m de résolution
***Côte NGF du plan d'eau** : valeur utilisée dans la modélisation de l'inondation dans le PPRi de La Touques (DDTM, 2016)
****Point de contrôle** : point déterminé au croisement entre la côte NGF du plan d'eau (issue du PPRI - DDTM 14, 2016) et le tracé de La Touques renseigné par la BD TOPO (IGN, 2017)

Figure 5.30 : Comparaison de l'extension spatiale de la lame d'eau déterminée par l'analyse hydrogéomorphologique de La Touque (DDTM) et la modélisation HEC RAS

À chaque point de contrôle, la lame d'eau calculée par la modélisation HEC RAS a été comparée à la lame d'eau déterminée à partir de la cartographie du PPRi (Tableau 5.6). La modélisation a été réalisée dans le fond de vallée et non sur les vallons secs ou drainés (e.g. bassin de L'Epinay, etc.) ce qui explique l'absence d'écoulement sur ces secteurs dans la modélisation HEC RAS.

Tableau 5.6. Comparaison entre les valeurs des lames d'eau déterminées à partir de la cartographie du PPRi et les lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS au droit des points de contrôle sur La Touques

Point de contrôle	*Cote NGF du plan d'eau (m)*	*Altitude du fond du chenal (m NGF)*	*Lame d'eau issue du PPRi (m)*	*Lame d'eau calculée avec HEC RAS (m)*	*Différence entre les lames d'eau PPRi et HEC RAS*
1	4,50	-2,00	6,50	6.17	- 0,33
2	4,80	-2,00	6,80	7.11	0,31
3	5,00	-2,00	7,00	7.29	0,29
4	5,50	-2,00	7,50	7.29	- 0,21
5	5,50	1,19	4,31	4.39	0,08
6	5,50	1,69	3,81	3.81	0,00
7	5,51	2,80	2,71	2.70	- 0,01
8	5,52	2,90	2,62	2.75	0,13
9	5,53	3,20	2,33	2.25	- 0,08
10	6,00	4,30	1,70	1,63	- 0,07
11	6,50	5,15	1,35	1.48	0,13
12	9,00	7,30	1.70	1.71	0,01

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) des résultats de la modélisation HEC RAS est d'environ 0,15 cm pour un coefficient de corrélation de 0,995 (Figure 5.31). Les différences les plus importantes sont de l'ordre de 25 cm et se localisent à l'exutoire de La Touques dans la partie chenalisée du drain. Depuis le centre, au-delà de la route D27, et jusqu'en amont de la basse vallée de La Touques (à Pont-L'Évêque), les écarts entre la modélisation et les cotes NGF du plan d'eau sont très faibles et en moyenne de 3 à 4 cm.

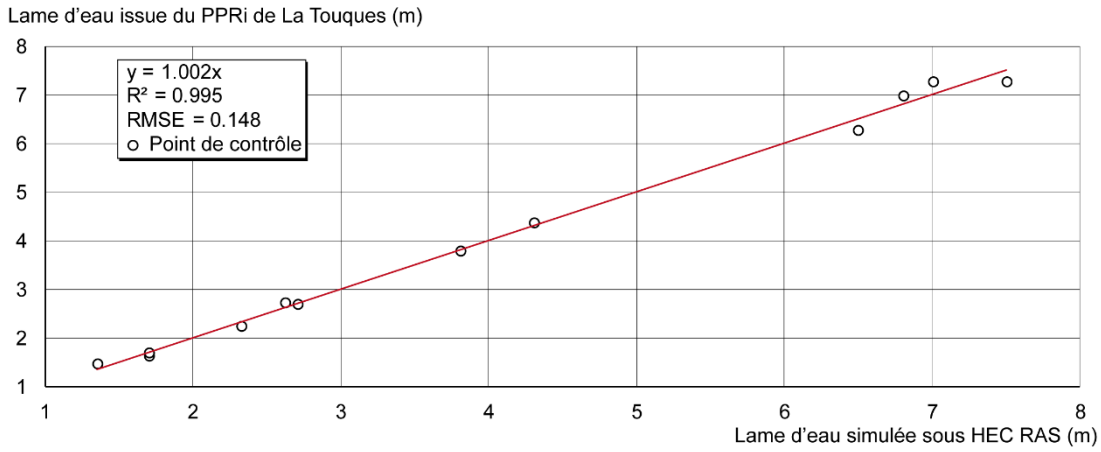


Figure 5.31 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau déterminées à partir de la cartographie du PPRi au droit des points de contrôle sur La Touques

Ces écarts se font spatialement ressentir principalement en aval de Deauville sur l'hippodrome de Clairefontaine où la modélisation conduit à inonder entièrement cet espace tandis que l'analyse hydrogéomorphologique considère qu'une partie seulement est touchée. Au regard des différences entre l'analyse de la DDTM et les résultats de modélisation, le paramétrage du modèle est jugé tout de même fiable de l'amont jusqu'au centre (RD27) de la basse vallée. Dans la partie chenalisée, à l'embouchure de La Touques, les résultats sont à considérer avec davantage de précaution.

5.4.1.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Touques (tempête Eleanor, 3 et 4 janvier 2018)

Les résultats des modélisations du débordement du cours d'eau de La Touques les 3 et4 janvier 2018 avec et sans blocage des écoulements par la mer sont présentés dans la Figure 5.32. Pour rappel, la situation avec un blocage des écoulements par la mer, obtenue à partir des données de la station hydrologique de Pont-L'Évêque, comprend un débit de 53,7 $m^3.s^{-1}$ et une lame d'eau de 2,31 m. Nous avons estimé que la lame d'excédentaire était de l'ordre de 3 % ce qui amène à une situation sans blocage des écoulements par la mer à des débits d'environ 52,1 $m^3.s^{-1}$ et une lame d'eau de 2,24 m.

Les surfaces d'eau excédentaires engendrées par un effet potentiel de concomitance, le 3 et 4 janvier 2018 durant la tempête Eleanor, ont été d'approximativement de 4,6 hectares. On constate que ces débordements se sont retrouvés principalement dans la plaine inondable, n'ayant pas impacté Deauville et Trouville-sur-Mer, avec un secteur préférentiel d'accumulation des eaux en aval de la levée sur la RD27 (Figure 5.32 – (A), T2 à T5). Les volumes d'eau excédentaires sont de l'ordre de 32 400 m^3 avec une estimation basse à 32 000 m^3 et une estimation hauteur à 33 000 m^3 dans la basse vallée (Tableau 5.7).

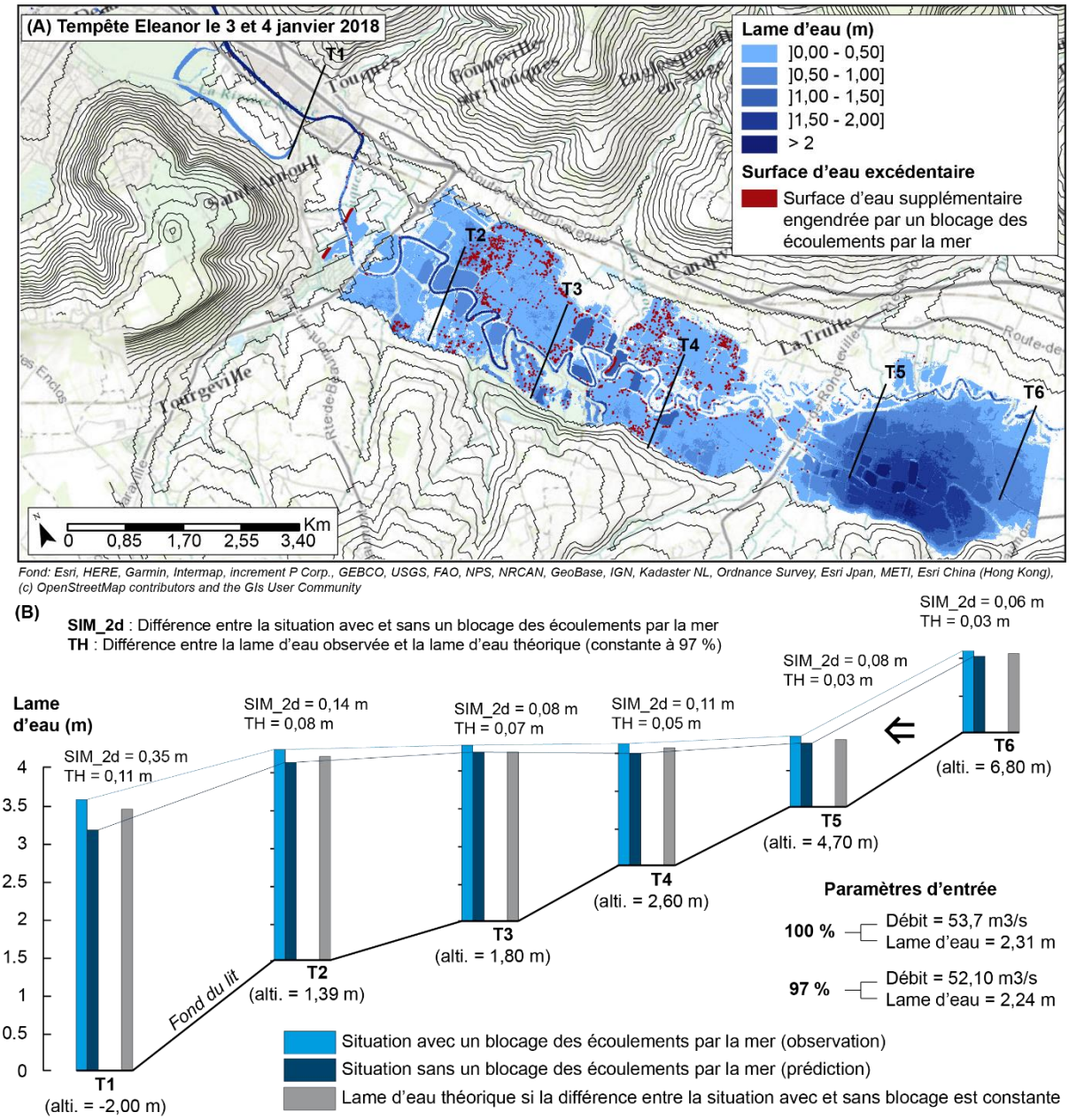


Figure 5.32 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 97 %) dans la basse vallée de La Touques les 3 et 4 janvier 2018

Tableau 5.7. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Touques durant la tempête Eleanor

Nombre de pixels	*Surface (m²)*	*Lame d'eau moyenne (m)*	*Surface totale (ha)*	*Volume (m³)*
119059	25	0	297	0
75558	25	]0 - 0.01]	188	18 889
23140	25	]0,01 - 0.02]	57	11 570
2159	25	]0,02 - 0.03]	5	1 619
327	25	> 0.04	0,8	327
			Total	32 405

Les différences de lame d'eau se sont principalement fait ressentir à partir du milieu de la basse vallée (Figure 5.32 – (B) T4) jusqu'à l'embouchure (T1) avec un maximum de 35 cm de différence dans la partie chenalisée de La Touques (Figure 5.32 – (B), SIM_2d sur le profil 1). Si le modèle avait considéré une différence constante de 3 % entre la lame d'eau observée et la modélisation dans un espace sans modèle numérique de terrain, la lame d'eau théorique de la situation sans blocage de l'écoulement aurait dû être de 11 cm (Figure 5.32 – (B), TH sur le profil 1).

Dans la plaine inondable (Figure 5.32 – T2 à T6), les différences entre les valeurs théoriques (TH) et la différence entre la situation avec et sans blocage sont plutôt équivalentes avec une différence moyenne de l'ordre de 4 cm. En aval de la basse vallée et dans la partie chenalisée, les différences entre la valeur SIM_2d et TH tendent à s'agrandir.

5.4.2. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée du Dun

La section 5.4.2.1 présente une estimation des marges d'erreur à partir de la comparaison entre les résultats de la modélisation avec HEC RAS du 26 décembre 1999 durant la tempête Lothar (plus importantes lames d'eau) et les témoignages renseignés dans les archives départementales par les habitants et les services de l'État.

La section 5.4.2.2 expose et analyse les résultats des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée du Dun durant la tempête Lothar du 26 décembre 1999.

5.4.2.1. Calcul des marges d'erreur de la modélisation hydraulique de la basse vallée du Dun par comparaison aux lames d'eau du PPRi

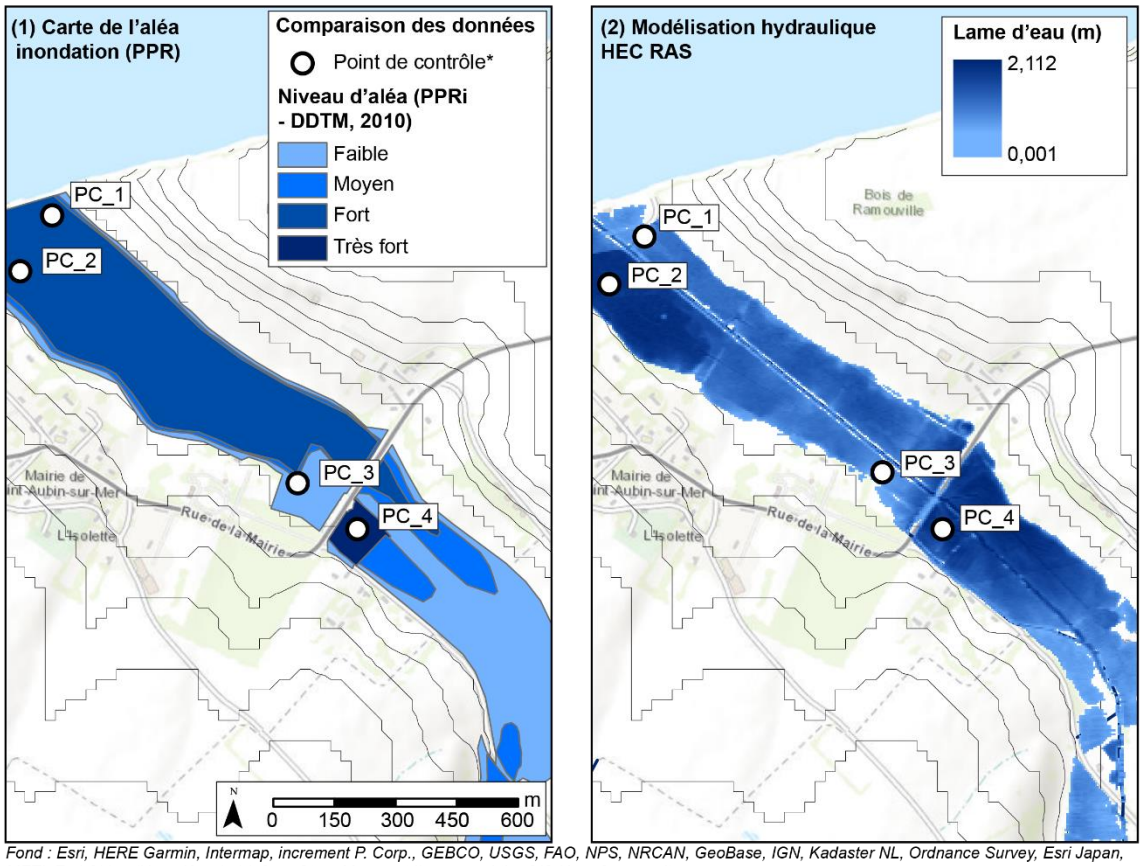
Sur le bassin du Dun, l'inondation du 26 décembre 1999, coïncidant avec la tempête Lothar, est l'événement de référence utilisé dans la cartographie de l'aléa inondation (Figure 5.33 – A). La modélisation HEC RAS (Figure 5.33 – B) reproduit cet événement et afin de juger de la qualité de la modélisation, quatre points de contrôle ont pu être identifiés par des témoignages issus des résidents et des services de l'État dans les archives départementales :

- PC_1 – Annexe 1.1.4 du PPRi du Dun (DDTM, 2011) : « *La base de loisirs (équipement communal) : située contre la digue, elle a été particulièrement touchée le 26 décembre 1999. […] Les terrains alentour étaient recouverts par 80 cm à 1 m d'eau* » ;
- PC_2 – Annexe 1.1.4 du PPRi du Dun (DDTM, 2011) : « *[…] sur cette rive la hauteur d'eau a atteint 1,80 m.* » ;
- PC_3 – Carte d'aléa du PPRi (produite par Egis eau en 2011 à partir du modèle Safran), lame d'eau comprise entre]0 - 0,5 m] (une valeur moyenne de 0,25 m a été retenue) ;
- PC_4 – Annexe 1.1.4 du PPRi du Dun (DDTM, 2011) : « *Le Club House et le terrain de tennis (communaux) situés en amont immédiat de la RD75 ont été inondés par une lame d'eau de près de 150 centimètres* ».

En amont de la basse vallée (PC 3 et PC 4), les résultats de la modélisation HEC RAS tendent à surestimer la lame d'eau d'environ 7 cm (Tableau 5.8). En aval de la basse vallée, les lames d'eau modélisées sont entre 10 cm (PC 2) et 20 cm (PC 1) inférieurs aux témoignages obtenus par les services de l'État.

L'augmentation des écarts entre les modélisations et les lames d'eau observées à l'exutoire (entre 10 et 150 m de la digue) peut être expliquée, au moins en partie, par le fait que nous ne tenons pas compte de l'apport des submersions marines dans la modélisation. La différence

entre ce que le modèle estime et les différents témoignages peut se traduire par 10 à 20 cm d'eau supplémentaire apportés par les vagues qui se seraient combinées aux lames d'eau et lames d'eau excédentaires issues d'un effet de blocage des écoulements par la mer.



Fond : Esri, HERE Garmin, Intermap, increment P. Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors and the GIS User Community
Isolignes issues du MNT SRTM (2010) à 25 m de résolution
***Point de contrôle (PC)** : point déterminé grâce aux annexes du PPRi du Dun (2011) à partir de témoignages recueillis et d'observations effectuées lors des reconnaissances de terrain et des questionnaires

Figure 5.33 : Comparaison de l'extension spatiale de la lame d'eau déterminée dans le PPRi du Dun et par la modélisation HEC RAS

Tableau 5.8. Comparaison entre les valeurs de lames d'eau issues des témoignages du PPRi du Dun (2010) et les lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS aux différents points de contrôle

Point de contrôle	*Lame d'eau issue du PPR (m)*	*Lame d'eau calculée avec HEC RAS (m)*
1	0,90	0,71
2	1,80	1,71
3	0,25	0,31
4	1,50	1,57

La modélisation du modèle sur la basse vallée présente une marge d'erreur (RMSE) d'environ 11 cm pour un coefficient de détermination de l'ordre de 0,97 par comparaison aux données observées (Figure 5.34). Les plus grosses erreurs de la modélisation sont principalement localisées à l'embouchure du Dun en raison de l'apport des eaux marines en période de tempête.

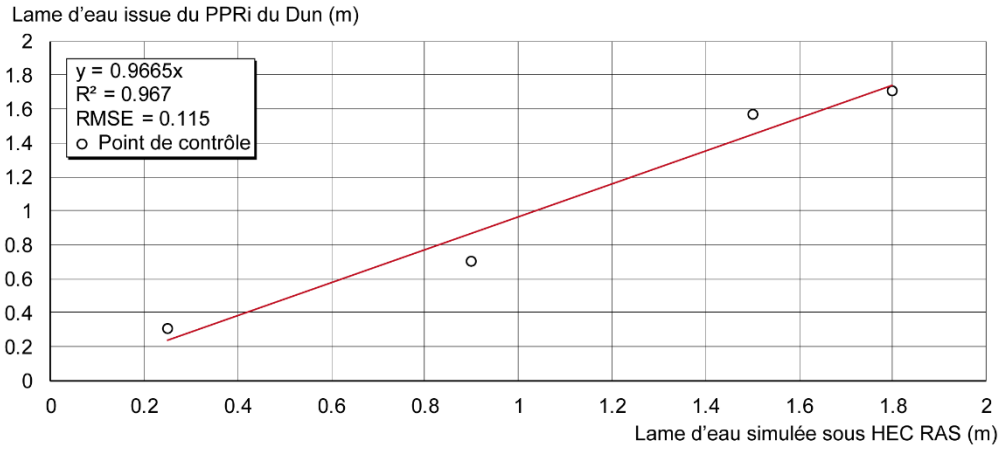


Figure 5.34 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau issues des témoignages relatés dans le PPRi du Dun)

Les résultats issus de la modélisation du modèle HEC RAS ont tendance à sous-estimer l'impact réel de l'inondation en raison de l'impossibilité de pouvoir intégrer les apports des submersions marines (paquet de mer) dans la basse vallée, alors que ne nous pouvons modéliser que les lames d'eau excédentaires engendrées par un blocage des écoulements.

5.4.2.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée du Dun (tempête Lothar, 26 décembre 1999)

La situation avec un blocage des écoulements par la mer, dans la basse vallée du Dun, est la même que celle présentée précédemment et coïncide avec la tempête Lothar du 26 décembre 1999 (Figure 5.35 – (A)). Les plus importants débordements ont été observés en aval de la basse vallée, près de la digue, et en rive gauche. Au regard de la lame d'eau, le Dun seul (sans considérer le blocage des écoulements) aurait suffi à inonder une partie des aménagements en bordure de digue. Pour rappel, les données entrées à la situation sans un blocage des écoulements par la mer, sont 15 % plus faibles que les données observées soit un débit et une lame d'eau respective de 7 $m^3.s^{-1}$ et de 0,88 m.

En amont de la levée sur la RD 75 (Figure 5.35 – (B), T6), la lame d'eau a finalement peu évolué entre les deux situations. Cela peut être expliqué par la présence des deux conduits (de 1 m de haut sur 1 m de large), ainsi que d'un effet de cuvette topographique en rive droite du cours d'eau. Ces cuvettes doivent être vues comme des zones de stockage des eaux. Lorsqu'une certaine limite est atteinte, le remplissage continuera dans une autre cuvette et ainsi de suite. Au-delà de la levée, les variations de lame d'eau sont beaucoup plus importantes atteignant jusqu'à 22 cm de différence entre la situation avec blocage et sans blocage des écoulements (Figure 5.35 – (B), T5).

En raison de l'aspect en cuvette en aval de la basse vallée, au nord de la RD 75, les variations de la lame d'eau entre la situation avec blocage et sans un blocage des écoulements sont en moyenne de 0,15 m (SIM_2d) contre une moyenne de 0,21 m par rapport à ceux qui auraient dû être estimés dans un environnement sans aucune contrainte géographique (TH). Les valeurs théoriques (TH) plus importantes que les valeurs modélisées par la modélisation peuvent s'expliquer par la présence des deux conduits à l'embouchure du Dun entraînant une plus grande difficulté pour le cours d'eau à s'écouler.

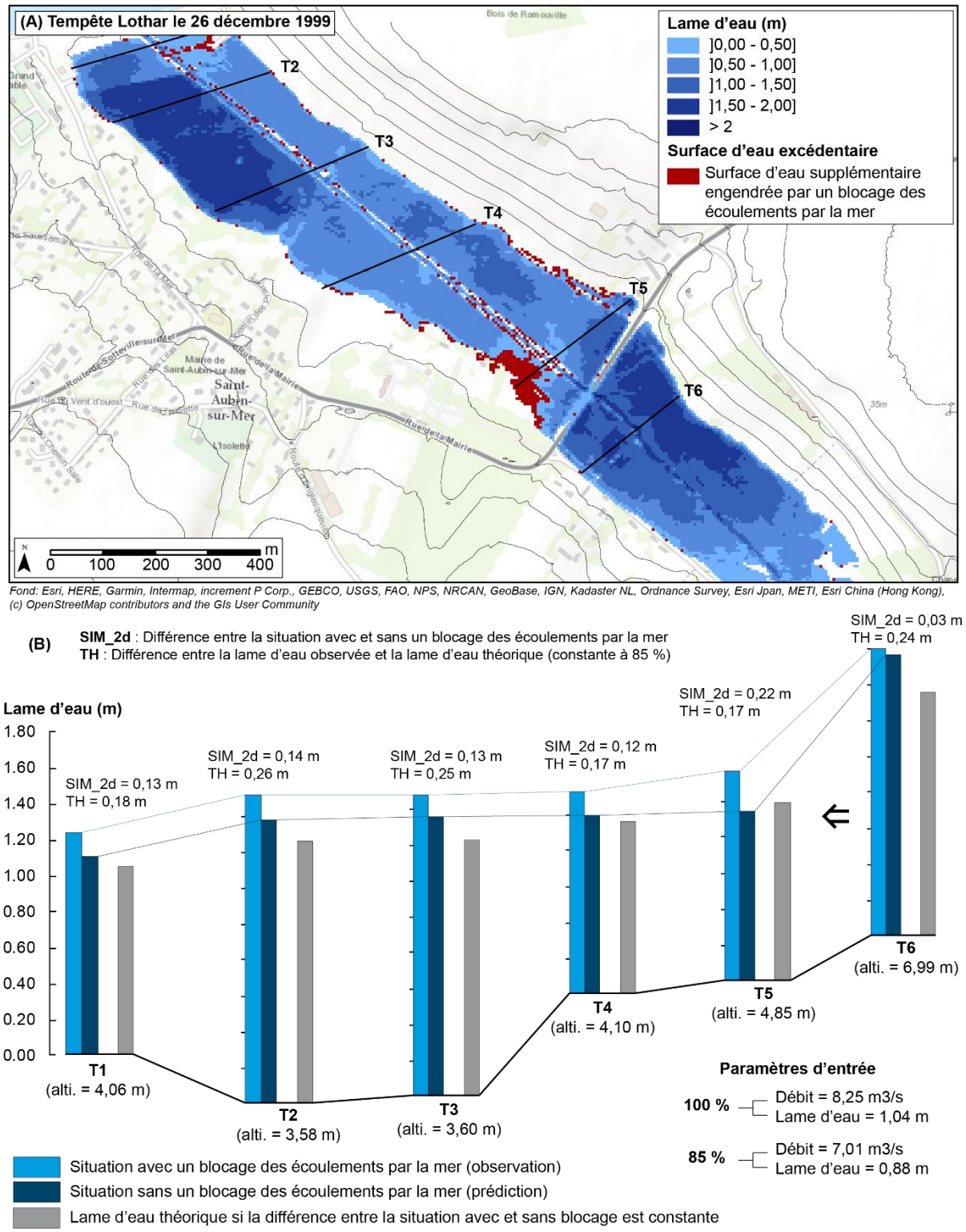


Figure 5.35 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 85 %) dans la basse vallée du Dun le 26 décembre 1999

Les différences de surfaces inondées entre la situation avec et sans blocage des écoulements par la mer durant la tempête Lothar correspondent à une superficie de 1,45 hectare supplémentaire de zones inondées. Ces surfaces d'eau excédentaires sont principalement situées au nord de la levée sur la RD 75. Les différences entre les deux situations se traduisent

surtout par une différence de hauteur des écoulements. Nous avons estimé les volumes d'eau excédentaires à d'environ 34 800 m³ pour une estimation basse à 34 000 m³ et une estimation haute à 35 000 m³ (Tableau 5.9).

Tableau 5.9. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée du Dun durant la tempête Lothar

Nombre de pixels	*Surface par pixel (m²)*	*Lame d'eau moyenne (m)*	*Surface totale (ha)*	*Volume (m³)*
801	25	0	2,0	0
10 629	25	]0 - 0,05]	26,5	9 142
250	25	]0,05 - 0,1]	12,2	16 337
1 041	25	]0,1 - 0,2]	2,6	5 704
660	25	> 0,2	1,7	3 630
			Total	34 814

5.4.3. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée de L'Yères

La section 5.4.3.1 compare la modélisation du 26 décembre 1999 durant la tempête Lothar (plus importantes lames d'eau) avec les informations disponibles dans les archives départementales afin de contrôler la validité des résultats obtenus. La section 5.4.3.2 analyse les résultats des modélisations selon des situations avec et sans un blocage des écoulements par la mer à cette même période.

5.4.3.1. Contrôle de la validité de la modélisation hydraulique de la basse vallée de L'Yères

Les interactions entre les débordements de cours d'eau et les submersions marines sont particulièrement fortes à l'embouchure de L'Yères, depuis Criel-sur-Mer à la digue de protection à la mer (DDTM, 2016). Cependant, l'unique cartographie en période de débordement est issue du PPR multi-aléas où les submersions marines ont été intégrées aux débordements dans la plaine inondable (Figure 5.36 – A). L'intrusion fréquente d'eau marine dans la basse vallée de L'Yères a permis le développement d'espèces halophiles et les services qualifient cette espace comme un estuaire[8]. Un unique point de contrôle a pu être déterminé dans le centre-ville de Criel-sur-Mer décrivant la situation suivante :

- PPR multi-aléas de Criel-sur-Mer (DDTM, 2016) : « *L'inondation connue la plus importante par débordement de L'Yères est l'événement de décembre 1999. Les hauteurs d'eau ont atteint 50 à 80 cm dans le centre de Criel-sur-Mer* ».

Malgré les recherches effectuées, nous n'avons pas trouvé d'information complémentaire sur les cotes NGF des surfaces en eau ou de témoignages permettant de préciser qu'elles étaient les lames d'eau en différents endroits précis.

L'unique point de contrôle déterminé dans la basse vallée estime une lame d'eau comprise entre 0,5 et 0,8 m (Tableau 5.10). Malgré une absence d'autres points de contrôle sur cette basse

[8] *Les unités paysagères de la basse vallée de L'Yères disponible sur* http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/

vallée, la modélisation HEC RAS se rapproche de ce qui s'est produit pour la reconstitution de la crue de référence du 26 décembre 1999.

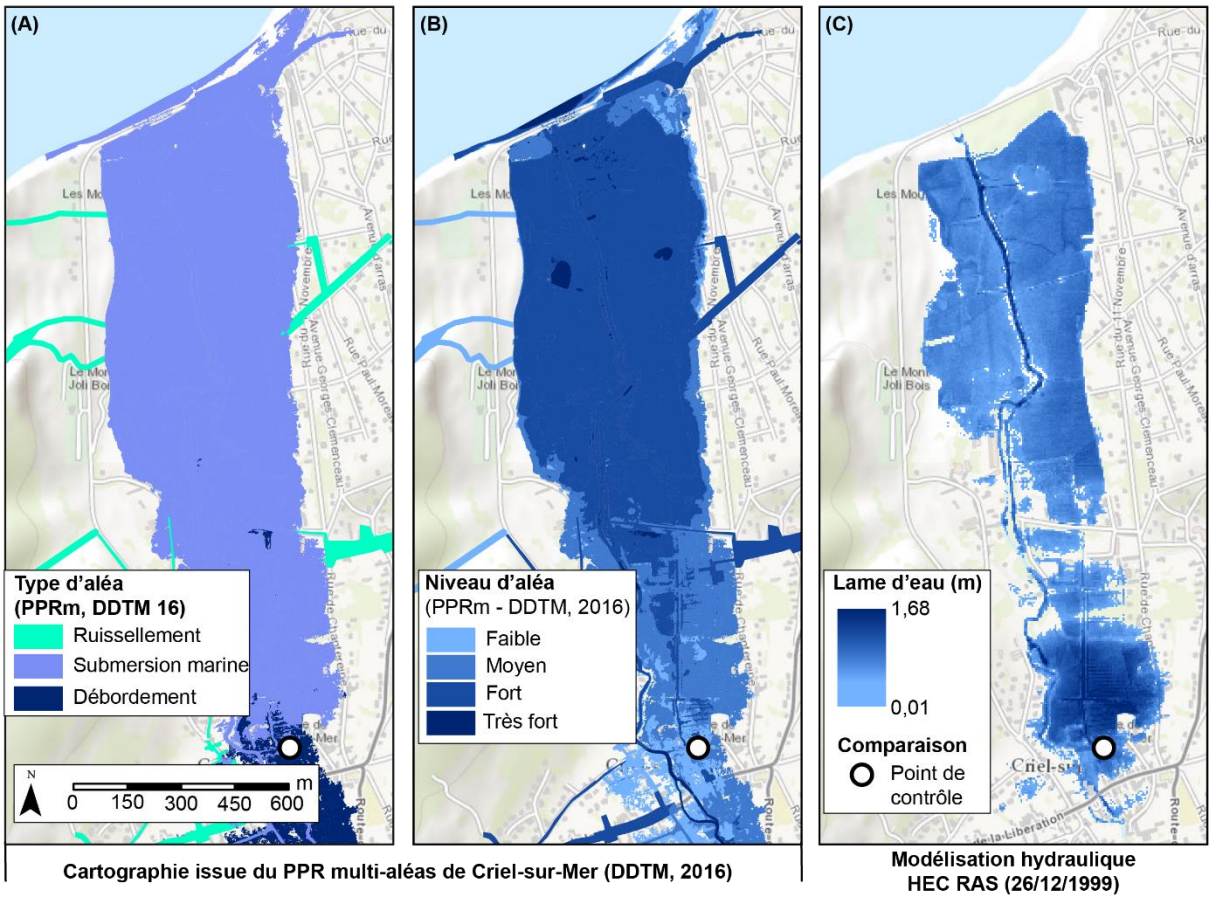


Figure 5.36 : Extension spatiale de la crue de référence (26/12/1999) dans la basse vallée de L'Yères selon le PPR multi-aléas (DDTM, 2016) et la modélisation hydraulique HEC RAS

Les principaux écarts entre la spatialisation HEC RAS et celle du PPR sont situés au niveau de la digue à l'embouchure de L'Yères et peuvent s'expliquer par l'apport des vagues dans la basse vallée durant la tempête se mélangeant aux apports fluviaux.

Tableau 5.10. Comparaison entre la lame d'eau issue des témoignages dans le PPRm de Criel-sur-Mer (2016) et la lame d'eau calculée par la modélisation HEC RAS à un point de contrôle situé à Criel-sur-Mer

Point de contrôle	*Lame d'eau issue du PPRm (m)*	*Lame d'eau issue de HEC RAS (m)*
1	0,50 à 0,80	0,66

Les résultats des modélisations apparaissent en dessous des observations pour ce qui concerne les volumes d'eau observés dans la basse vallée durant la tempête Lothar du 26 décembre 1999 en raison de l'impossibilité d'intégrer les apports d'eau marine dans le modèle, mais seulement l'effet de blocage des eaux fluviatiles par la mer.

5.4.3.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de L'Yères (tempête Lothar, 26 décembre 1999)

Le débordement de cours d'eau, concomitant avec la tempête Lothar le 26 décembre 1999, est le plus important enregistré dans la basse vallée de L'Yères depuis les années 1980 (Figure 5.37 – (A)). La basse vallée de L'Yères, ainsi qu'une partie de l'agglomération de Criel-sur-Mer se sont retrouvées inondées.

Au regard des analyses statistiques, les effets de blocage des écoulements durant ce débordement ont été estimés à environ 33 % soit une situation prédite sans blocage des écoulements avec un débit et une lame d'eau à 6,67 $m^3.s^{-1}$ et 0,73 m (contre 9,96 $m^3.s^{-1}$ et 1,09 m observé à Touffreville-sur-Eu).

Les conditions météorologiques et hydrologiques seules auraient potentiellement suffi à inonder une grande partie de la basse vallée de L'Yères le 26 décembre avec des pics de lame d'eau pouvant dépasser les 1,4 m dans les secteurs d'accumulation les plus bas de la basse vallée. En considérant exclusivement les apports du cours d'eau, les plus importantes accumulations d'eau sont localisées dans « *la zone humide du Manoir de Criel-sur-Mer* » correspondant à un point topographiquement bas de la vallée reliée directement à L'Yères (Figure 5.37 – (A) et (B), profils T5 et T6). Le profil en toit en aval de la basse vallée jusqu'à l'embouchure de L'Yères (Figure 5.37 – (A) et (B), profils T1 à T4), a favorisé une accumulation plus importante de l'eau en extrémité de la rive droite et de la rive gauche (gouttière) dans la plaine inondable. Contraint par deux conduits localisés au droit de la digue de protection à la mer, L'Yères tend à se remplir comme un bassin en aval de la basse vallée et les surfaces excédentaires les plus importantes sont localisées au droit du profil T3 (Figure 5.37 – (A)).

Les différences entre la situation avec et sans blocage des écoulements (SIM_2d) et la lame d'eau théorique (TH) sont plus fortes dans Criel-sur-Mer avec en moyenne - 0,18 m entre SIM_2d et TH depuis les profils T4 à T6 (Figure 5.37 – (A)). Dans l'aval de la basse vallée, ces écarts entre la valeur modélisée et théorique se réduisent à 0,05 m entre profilsT1 à T4 (Figure 5.37 – (A)). Cette plus forte disparité en amont de la basse vallée peut s'expliquer par la présence de nombreux conduits dans Criel-sur-Mer, ainsi que d'un important effet de cuvette favorisant une accumulation des écoulements.

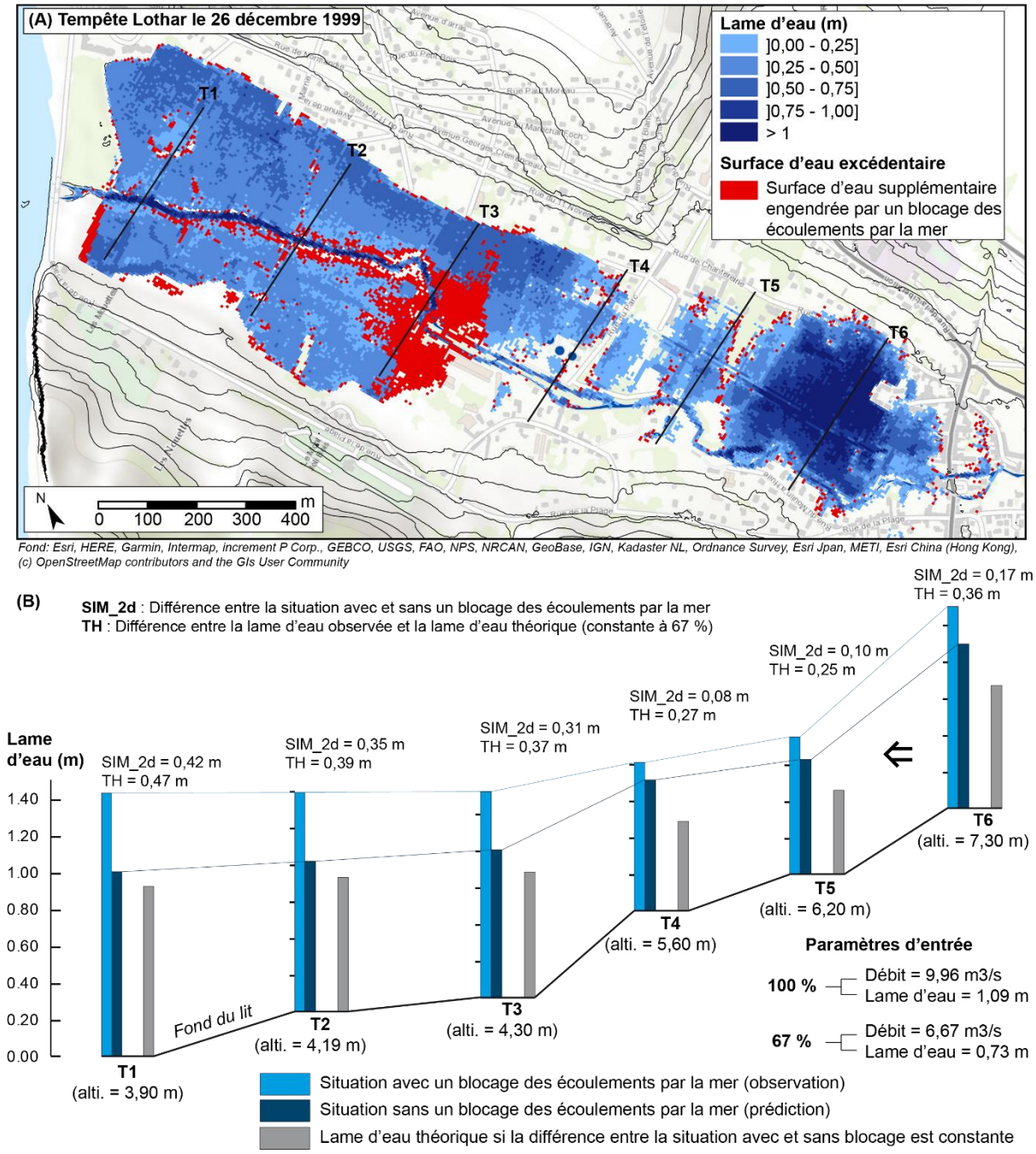


Figure 5.37 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 67 %) dans la basse vallée de L'Yères le 26 décembre 1999

Ces différences de surface entre la situation avec et sans un blocage des écoulements par la mer durant la tempête Lothar auraient engendré une superficie de 6,7 hectares supplémentaires de zones inondées. Ces surfaces d'eau excédentaires sont principalement situées en aval de la basse vallée, dans la plaine inondable, et au nord de Criel-sur-Mer. Les volumes d'eau excédentaires ont ainsi été estimés à 56 500 m³ (estimation basse à 56 000 m³ et estimation haute à 57 000 m³) (Tableau 5.11).

Tableau 5.11. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de L'Yères durant la tempête Lothar

Nombre de pixels	*Surface par pixel (m²)*	*Lame d'eau moyenne (m)*	*Surface totale (ha)*	*VEE (m³)*
517	25	0	1,3	0
5 184	25	]0 - 0,1]	12,9	6 227
11 682	25	]0,1 - 0,2]	29,2	41 302
334	25	]0,2 - 0,3]	0,8	2 110
284	25	]0,3 - 0,4]	0,7	2 499
323	25	]0,4 - 0,5]	0,8	3 674
74	25	> 0,5	0,2	967
			Total	56 779

Pour rappel, ces volumes n'intègrent pas les apports par la mer et restent une première estimation issue de la modélisation et en considérant les apports de la houle à cette même période, ces volumes pourraient être plus importants.

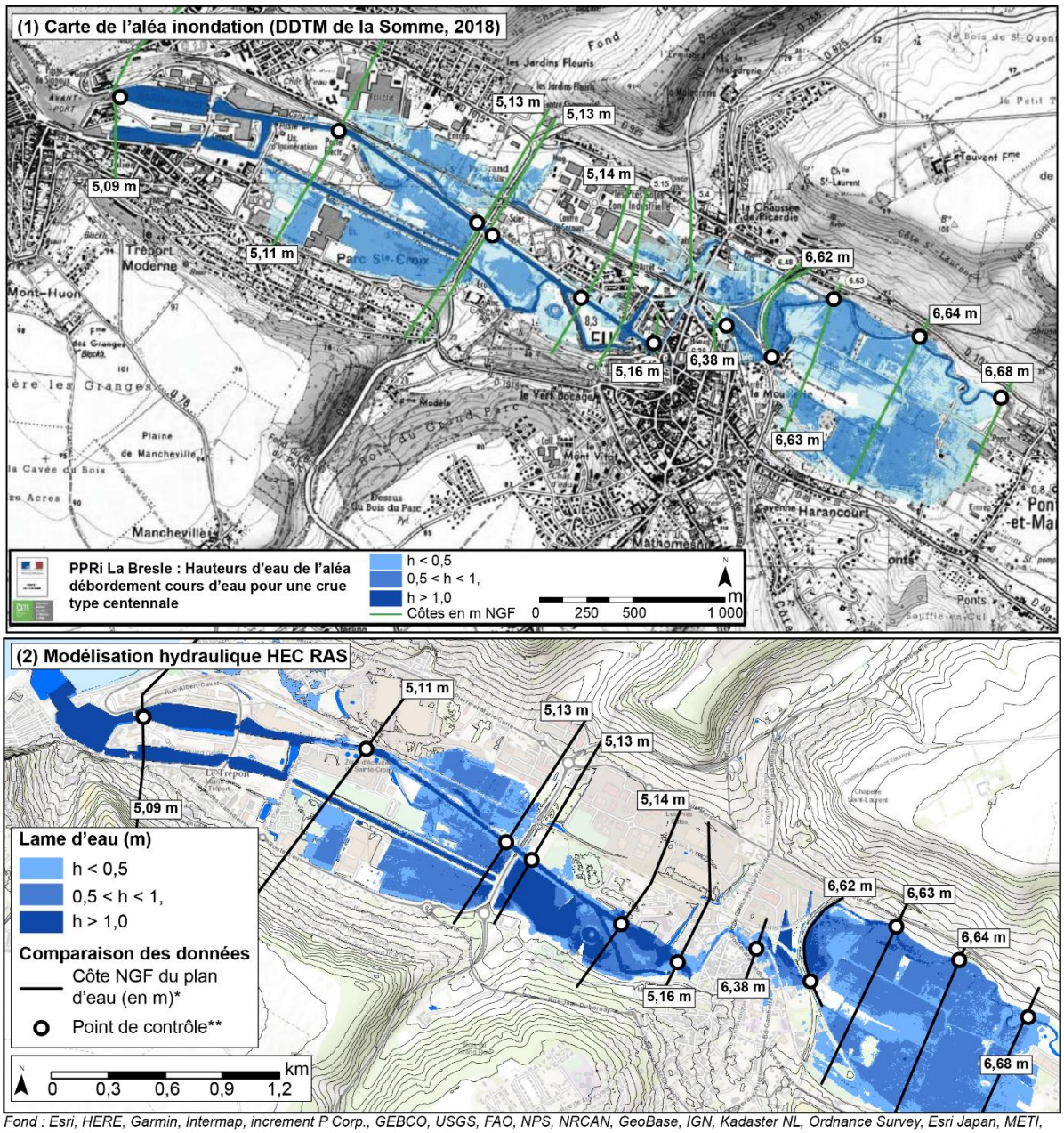
5.4.4. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée de la Bresle

La section 5.4.4.1 compare les résultats de modélisation du 27 décembre 1999 durant la tempête Martin (plus importantes lames d'eau) avec les cotes NGF du plan d'eau fournies par la cartographie du PPRi de la basse vallée de La Bresle. La section 5.4.4.2 analyse les résultats des situations avec et sans un blocage des écoulements par la mer à cette même période.

5.4.4.1. Calcul des marges d'erreur de la modélisation hydraulique de la basse vallée de La Bresle par comparaison aux lames d'eau du PPRm

Au regard des données hydrologiques mesurées (débit et lame d'eau) de la station hydrologique Ponts-et-Marais, ainsi que des informations recueillies par le service Vigicrues, le débordement de cours d'eau le plus important enregistré dans la basse vallée de La Bresle s'est produit lors de la tempête Lothar du 27 décembre 1999, avec un débit de 18,6 $m^3.s^{-1}$ et une lame d'eau de 1,08 m.

Ce débordement de cours d'eau a été retenu comme l'événement de référence pour l'élaboration du PPRi dans la basse vallée de La Bresle (DDTM, 2018). Durant cet épisode, les cotes NGF du plan d'eau ont été relevées par les services de l'État en différents points (Figure 5.38 – (1)). Nous avons alors reproduit ces débordements du cours d'eau grâce à la modélisation HEC RAS en intégrant les données de la station hydrologique afin de valider le modèle par rapport aux informations fournies par le PPRi (Figure 5.38 – (2)).



Fond : Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors and the GIS User Community

Côte NGF du plan d'eau (en m)* : valeur utilisée dans la modélisation de l'inondation dans le PPRm de La Bresle (DDTM 76, 2018)
Point de contrôle** : Point déterminé au croisement de la côte NGF du plan d'eau (issue du PPRm - DDTM 76, 2018) et du tracé de La Bresle renseigné par la BD TOPO (IGN, 2017)

Figure 5.38 : Comparaison de l'extension spatiale de la lame d'eau déterminée dans le PPRi de la basse vallée de La Bresle (crue de référence) et par la modélisation HEC RAS

Au total, 11 points de contrôle (cote NGF du plan d'eau) ont pu être comparés. Les écarts entre la lame d'eau issue de la modélisation HEC RAS et les cotes NGF du plan d'eau du PPRi sont en moyenne de 7 cm avec un maximum de 21 cm (Tableau 5.12). Les plus fortes variations se retrouvent principalement entre Eu et Le Tréport où les aménagements hydrauliques sont particulièrement denses afin de réguler les flux de la Bresle.

Tableau 5.12. Comparaison entre les valeurs des lames d'eau déterminées à partir des cotes NGF du plan d'eau (PPRi) et les lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS au droit des points de contrôle de La Bresle

Point de contrôle	*Cote NGF du plan d'eau*	*Altitude du fond du chenal (m NGF)*	*Lame d'eau issue du PPRi (m)*	*Lame d'eau calculée avec HEC RAS (m)*	*Différence entre les lames d'eau PPRi et HEC RAS*
1	5.09	-2,00	7,09	7,00	-0,09
2	5.11	3,28	1,83	1,87	0,04
3	5.13	3,26	1,87	1,92	0,05
4	5.13	3,07	2,06	2,12	0,06
5	5.14	3,3	1,84	2,05	0,21
6	5.15	3,5	1,65	1,78	0,13
7	6.38	5,3	1,08	1,14	0,06
8	6.62	5,7	0,92	0,99	0,07
9	6.63	5,69	0,94	1,08	0,14
10	6.64	5,8	0,84	0,96	0,12
11	6.68	5,69	0,99	1,05	0,06

Au regard de l'ensemble des points de contrôle, l'erreur quadratique (RMSE) est d'environ 0,11 m avec un coefficient de détermination estimé à 0,996 (Figure 5.39). Pour rappel, un clapet permet de contrôler les flux de La Bresle dans le port de Mers-les-Bains et Le Tréport ; ce dernier se fermant en période de hautes mers et privant temporairement La Bresle d'un exutoire.

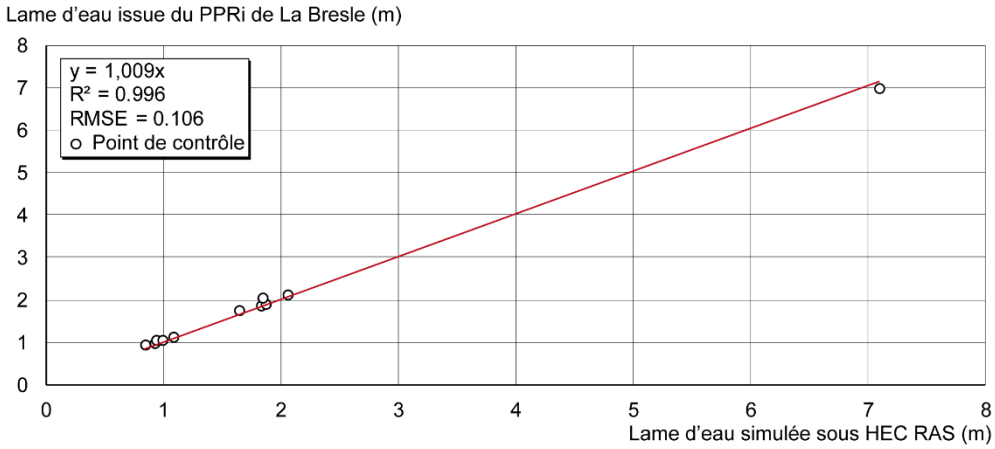


Figure 5.39 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau déterminées à partir de la cartographie du PPRi de La Bresle au droit des points de contrôle dans la basse vallée de La Bresle

5.4.4.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Bresle (tempête Martin, 27 décembre 1999)

Les résultats de la modélisation de la situation avec un blocage des écoulements par la mer le 27 décembre 1999 (observation) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction), en lien avec la tempête Martin, sont présentés dans la Figure 5.40 (A). Comme décrit dans les archives, ce débordement de cours d'eau a principalement touché des secteurs non urbanisés tels que la plaine inondable en amont de l'agglomération d'Eu où les principaux éléments impactés sont des jardins communaux. Entre Eu et le Tréport, les débordements sont restés localisés dans des secteurs enherbés.

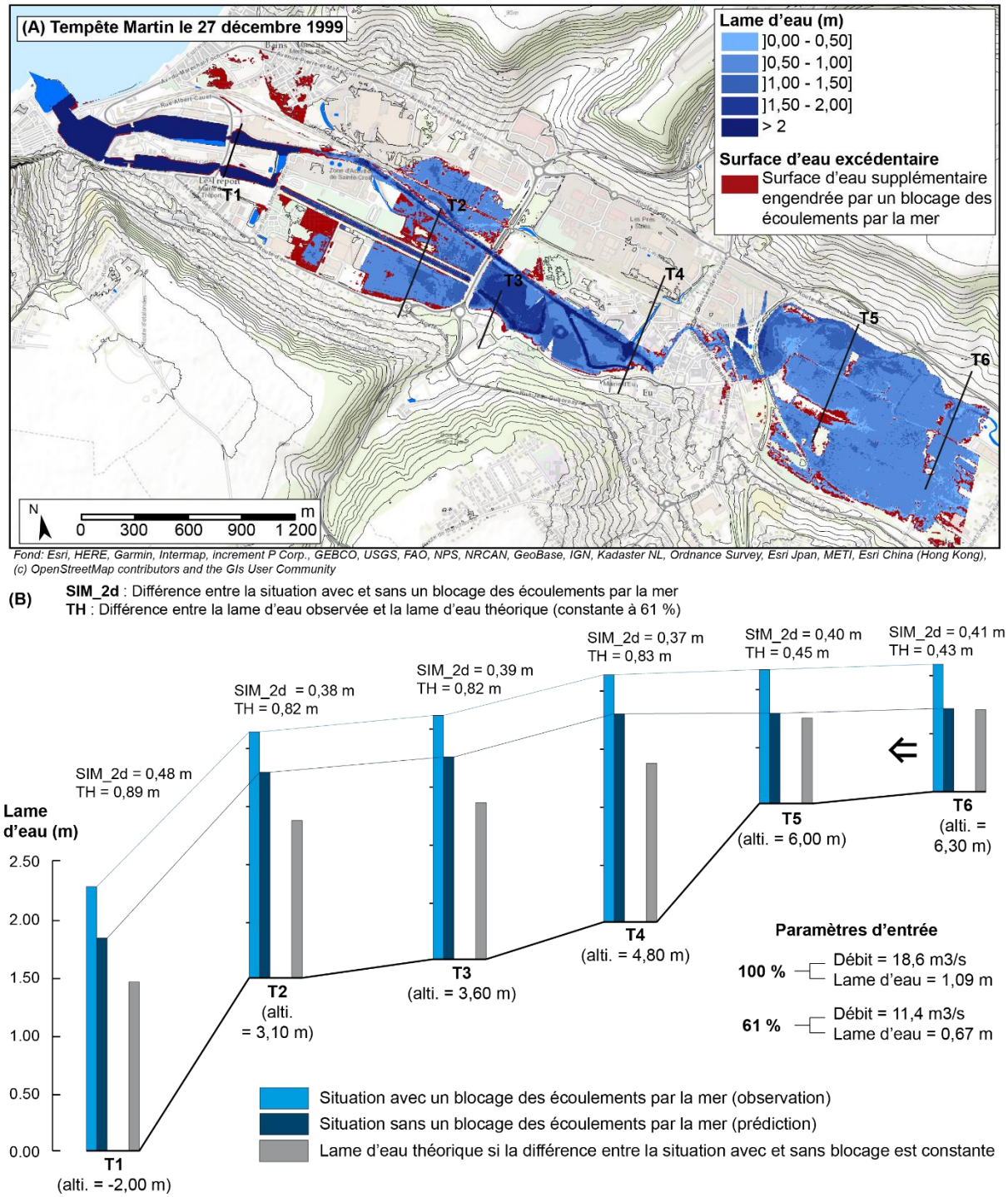


Figure 5.40 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 61 %) dans la basse vallée de La Bresle le 27 décembre 1999

Les écarts entre les situations avec un blocage et sans un blocage des écoulements par la mer sont relativement homogènes de l'amont jusqu'à l'exutoire avec une différence moyenne de 0,41 m et pour un écart-type de 0,04. Les écarts entre les résultats de modélisation SIM_2d et les valeurs théoriques (TH) sont très faibles en amont de la basse vallée de La Bresle, dans la plaine inondable aux points T6 et T5 (Figure 5.40 – (B)). Cette différence augmente progressivement du point T4 au point T1 avec une lame d'eau environ 40 cm supérieurs dans le cours d'eau. Cette différence s'explique par l'absence même d'exutoire de La Bresle en période

de haut niveau marin. La lame d'eau tend à s'accumuler progressivement dans le chenal et le canal alors qu'elle aurait dû théoriquement s'écouler dans la mer.

Les différences de surface entre la situation avec et sans un blocage des écoulements par la mer durant la tempête Martin auraient engendré une superficie de 27 hectares supplémentaires de zones inondées. Ces surfaces d'eau excédentaires sont principalement situées en amont d'Eu dans la plaine inondable ainsi qu'en aval de la basse vallée au-delà de RD 925. Nous avons estimé des volumes d'eau excédentaires de l'ordre de 136 600 m³ avec une estimation basse de 136 000 m³ et une estimation haute de 137 000 m³ (Tableau 5.13).

Tableau 5.13. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Bresle durant la tempête Martin

Nombre de pixels	*Surface par pixel*	*Lame d'eau moyenne (m)*	*Surface totale (ha)*	*Volume (m³)*
407	25	]0 - 0,2]	1,0	1 617
15 694	25	]0,2 - 0,4]	39,2	107 597
878	25	]0,4 - 0,6]	2,2	11 325
728	25	]0,6 - 0,8]	1,8	13 484
125	25	> 0,8	0,3	2 622
			Total	136 645

5.5. Analyse des effets de blocage des écoulements par la mer dans les basses vallées

Nous avons montré qu'il était possible d'estimer le blocage de l'écoulement des eaux fluviatiles par la mer et de ses conséquences en termes de lame d'eau excédentaire, de surface d'eau excédentaire et de volume d'eau excédentaire à partir d'une modélisation hydraulique sous HEC RAS dans les basses vallées littorales. Les résultats ont été présentés successivement à l'échelle de chacune des basses vallées.

Dans la section 5.5.1, nous allons faire une synthèse et une analyse transversale de ces résultats afin de dégager des logiques et des hypothèses sur les effets de blocages des écoulements par la mer. La section 5.5.2 présentera une discussion sur l'évolution des effets de blocage des écoulements, leurs potentiels impacts à long terme et l'importance de tenir compte de ces effets de blocage dans un contexte de changement climatique.

5.5.1. Synthèse et analyse transversale des principaux résultats

A partir des points de contrôle utilisés pour le calcul des marges d'erreur des différents modèles, nous pouvons estimer des écarts moyens de l'ordre de 14 cm entre les données observées et modélisées (Figure 5.41). Nous considérons ainsi la qualité des modèles hydrauliques comme suffisant pour analyser les effets de blocage des écoulements fluviaux par la mer et ces conséquences en termes de lame d'eau, de surface d'eau et de volume d'eau excédentaires. Cependant, ces valeurs sont sous-estimées du fait que l'excédent des submersions marines n'est pas intégré à la modélisation lorsqu'elles ont lieu.

À travers l'analyse des marges d'erreur, l'excédent engendré par des submersions marines peut être supposé en analysant l'écart moyen, au plus près de la mer, entre les modélisations HEC RAS et les cotes NGF du plan d'eau fournies par les documents cartographiques des PPR ainsi que les témoignages issus des archives départementales. Ces écarts sont en moyenne de – 20 cm à l'aval des basses vallées (entre la modélisation hydraulique et l'observation ou modélisation

proposée dans les cartographies PPR). Bien que cela reste à confirmer, nous pouvons supposer que cette différence peut être expliquée en partie par les apports des submersions marines durant la tempête.

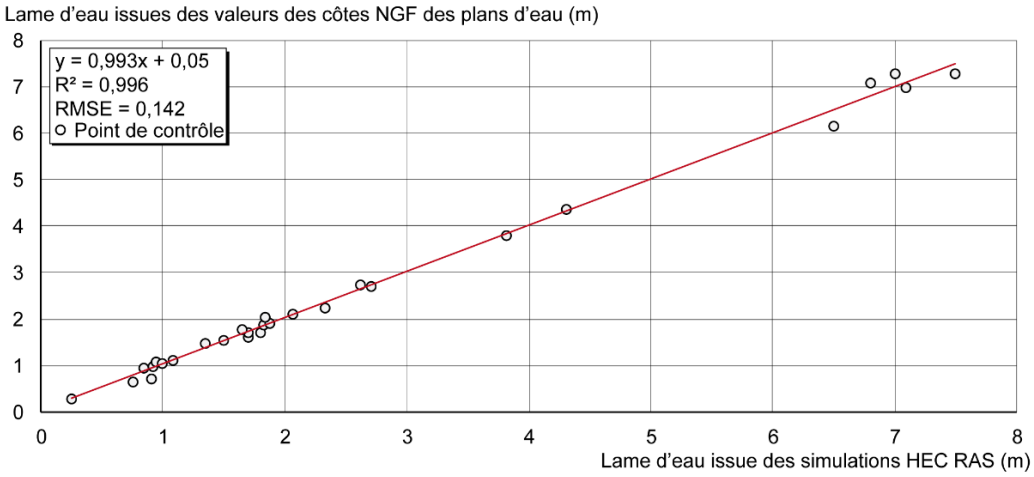


Figure 5.41 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau déterminées à partir des cartographies PPR pour l'ensemble des basses vallées

Les différences de lame d'eau, de surface d'eau et de volume entre les situations avec et sans un blocage des écoulements par la mer sont présentées pour chacune des basses vallées dans le Tableau 5.14. En se focalisant exclusivement sur les lames d'eau excédentaires durant une tempête, La Touques semble moins affectée que les autres avec seulement 7 cm contre un maximum de 42 cm sur La Bresle. Dans le chapitre 4, nous avions déjà émis des hypothèses pour expliquer les différences de lame d'eau entre les basses vallées : distance de la station hydrologique à la mer, orientation de la vallée, présence d'aménagement hydraulique.

La prise en compte des surfaces d'eau excédentaires et des volumes d'eau excédentaires permet d'affiner les analyses et d'apporter de nouvelles hypothèses pour expliquer cette différence entre les basses vallées. Pour seulement 7 cm de lame d'eau excédentaire sur La Touques, les surfaces d'eau excédentaires sont quatre fois supérieures à ceux du Dun comprenant une lame d'eau excédentaire de 16 cm (Tableau 5.14). Les surfaces excédentaires de la Touques sont un peu inférieures à ceux de L'Yères alors que sur cette basse vallée, la lame d'eau excédentaire a été estimée à 36 cm. Les basses vallées de La Touques, du Dun et de L'Yères, sont en dessous des valeurs de La Bresle.

Tableau 5.14. Synthèse des lames d'eau, surface en eau et volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS pour chacune des basses vallées et caractéristiques morphologiques des basses vallées

Basse vallée	*Lame d'eau excédentaire (cm)*	*Surface d'eau excédentaire (ha)*	*Volume d'eau excédentaire (millier de m³)*	*Longueur (km)*	*Largeur de la vallée (km)*	*Superficie (km²)*
La Touques	7	4,60	32,4	11,0	1,6	136,0
Le Dun	16	1,45	34,8	2,3	0,3	7,0
L'Yères	36	6,70	56,5	2,1	0,5	5,3
La Bresle	42	27,00	136,6	6,0	1,1	34

Il reste cependant difficile d'établir des comparaisons et des ordres de grandeur avec uniquement les valeurs absolues de surface et de volume d'eau excédentaire. Nous avons alors défini des ordres de grandeur en divisant la surface d'eau excédentaire par la lame d'eau

excédentaire (Tableau 5.15). Cette même logique a été appliquée pour établir des ordres de grandeur sur les volumes d'eau excédentaire.

Tableau 5.15. Ordres de grandeur des surfaces d'eau excédentaire supplémentaires et volumes d'eau excédentaire supplémentaires en cas d'inondation pour un centimètre de lame d'eau supplémentaire

Basse vallée	Rapport entre la surface en eau excédentaire et la lame d'eau excédentaire	Rapport entre le volume d'eau excédentaire et la lame d'eau excédentaire
La Touques	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **0,66 ha** de surface d'eau supplémentaire	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **4 600 m³** d'eau supplémentaire
La Bresle	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **0,64 ha** de surface d'eau supplémentaire	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **3 250** m³ d'eau supplémentaire
Le Dun	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **0,09 ha** de surface d'eau supplémentaire	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **2 180 m³** d'eau supplémentaire
L'Yères	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **0,19 ha** de surface d'eau supplémentaire	**1 cm** de lame d'eau excédentaire = **1 570 m³** d'eau supplémentaire

Le rapport, entre les surfaces (ainsi que les volumes) d'eau excédentaire sur les lames d'eau excédentaire, a montré que :

(1) **La basse vallée de la Touques** serait **la plus la sensible** aux effets de blocage par la mer ;

(2) La **basse vallée de La Bresle** serait également **fortement sensible** aux effets de blocage des écoulements ;

Il est finalement difficile de départager Le Dun et L'Yères dans ce classement puisque ces deux basses vallées ont des ordres de grandeur similaires en termes de surfaces excédentaires. En se focalisant exclusivement sur les volumes d'eau excédentaire :

(3) La **basse vallée du Dun** serait en troisième position ;

(4) La **basse vallée de L'Yères** serait en quatrième position avec finalement les plus faibles volumes d'eau excédentaires.

Ces ordres de grandeur montrent que l'analyse de la lame d'eau excédentaire est nécessaire, mais ne se suffit pas à elle seule pour pouvoir comprendre pleinement l'impact des effets de blocage des écoulements par la mer durant les tempêtes dans les basses vallées.

Pour expliquer ces différences d'ordre de grandeur, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'en période de débordement du cours d'eau, la morphologie (longueur, largeur, surface) influence la sensibilité de la basse vallée aux blocages des écoulements par la mer. Pour exemple, les basses vallées de La Touques et de La Bresle présentent toutes les deux une largeur de leur plaine alluviale supérieure à un kilomètre et pour des superficies allant de 34 km² (La Bresle) à 136 km² (La Touques) (Tableau 5.14). Ce sont donc des basses vallées larges où l'eau peut se répartir sans contraintes topographiques. À l'inverse, les plus faibles ordres de grandeur, en termes de surfaces en eau et volumes d'eau excédentaires, sont détenus par les basses vallées de L'Yères et du Dun ayant des fonds de vallées étroits (environ 400 m de large), de faibles longueurs (environ 2 km) et une faible superficie (environ 6 km²) (Tableau 5.15).

Nous pouvons donc considérer deux types de basses vallées : les basses vallées larges et les basses vallées étroites (Figure 5.42). Les basses vallées larges (*i.e.* avec un fond de vallée large)

auraient de plus faibles variations de lame d'eau excédentaire, mais de plus fortes variations de sa surface en eau et du volume d'eau excédentaire en raison d'un plus grand espace de mobilité du cours d'eau. A l'inverse, dans les basses vallées étroites, une inondation sans blocage des écoulements aurait tendance à remplir rapidement le fond de vallée et le blocage n'aurait alors pas beaucoup d'effet en termes d'extension étant donné qu'une grande partie de la vallée serait déjà initialement sous les eaux. Les volumes d'eau excédentaires pourraient être alors variables selon la longueur de la basse vallée. Plus la basse vallée serait grande, plus le volume d'eau excédentaire pourrait être potentiellement important.

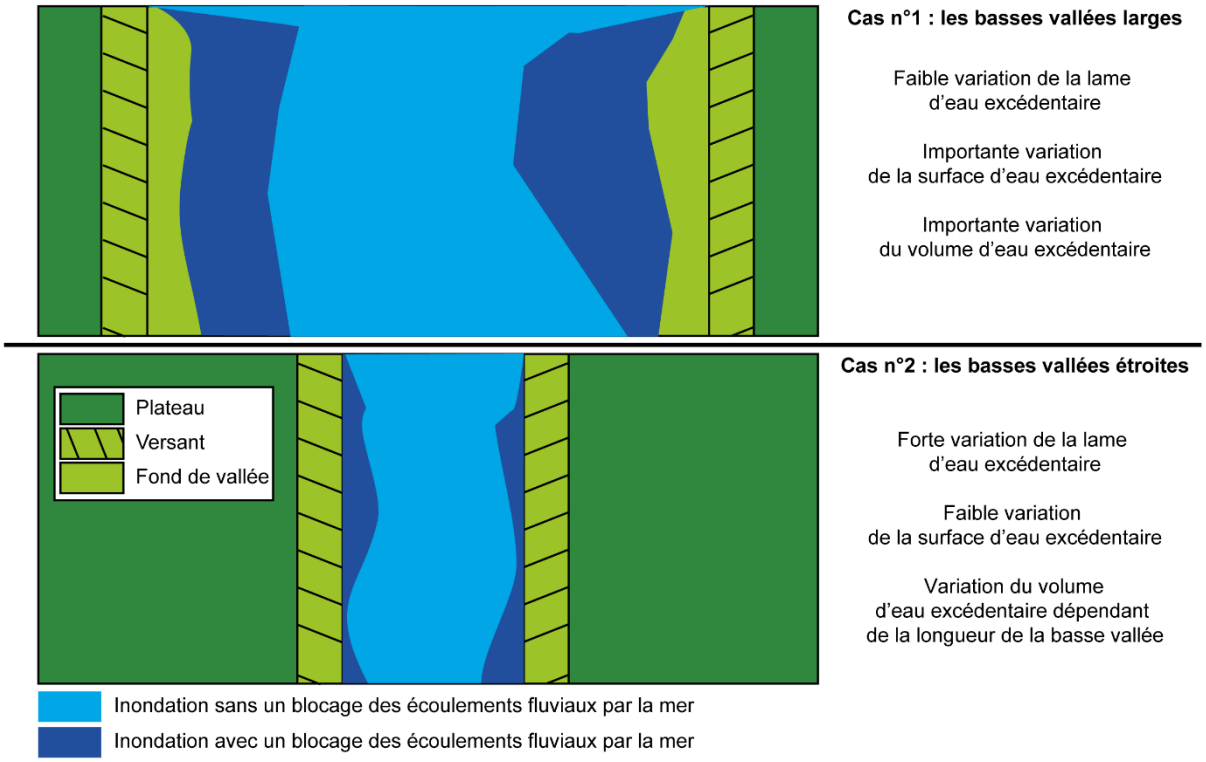


Figure 5.42 : Hypothèse du rôle de la morphologie des basses vallées lors d'un blocage des écoulements par la mer

Si cette première hypothèse permet de mieux comprendre les effets de blocage des écoulements entre les différentes unités hydrologiques (*i.e.* les basses vallées), elle est à affiner afin de comprendre les facteurs responsables de la répartition spatiale des surfaces d'eau excédentaires et des volumes d'eau excédentaires au sein même des basses vallées.

Afin de mieux comprendre comment a pu se répartir la surface et le volume d'eau excédentaire, nous avons utilisé les différences de lame d'eau excédentaire entre les situations avec et sans blocage des écoulements par la mer (le SIM_2d) pour chacun des six profils (Figure 5.43). Nous avons divisé arbitrairement la basse vallée en trois sous-unités hydrologiques (l'amont, le centre et l'aval) selon la topographie, la distance à la mer et la présence d'aménagement hydraulique.

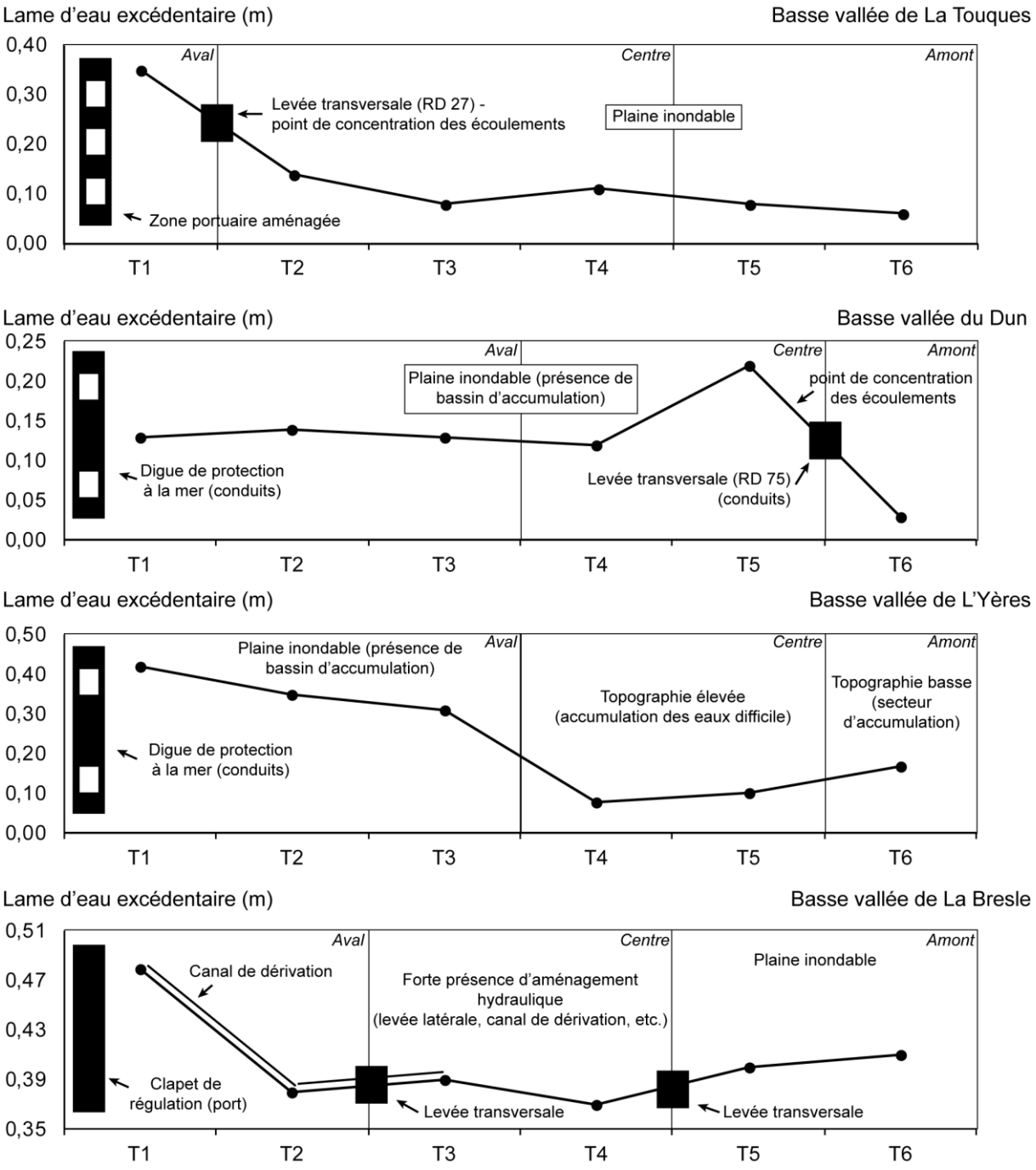


Figure 5.43 : Variations de la lame d'eau excédentaire selon les différents secteurs (amont, centre et aval) et selon les aménagements hydrauliques

De manière générale, il semble exister une augmentation progressive de la lame d'eau excédentaire (en période d'inondation) depuis l'amont jusqu'à l'aval de la basse vallée avec un pic de lame d'eau excédentaire au point le plus près de la mer. On peut cependant remarquer quelques différences entre les basses vallées.

- Dans la basse vallée de **La Touques**, les plus importantes lames d'eau excédentaires sont localisées après la levée transversale (Figure 5.43 – RD 27) où s'opère une concentration des écoulements dans un chenal entièrement artificialisé ;

- Dans la basse vallée **du Dun**, le pic de lame d'eau excédentaire est localisé en amont de la plaine alluviale juste à la sortie d'une levée transversale (la RD 75) après la concentration des écoulements. En amont de cette levée, les lames d'eau excédentaires sont presque nulles ;
- Dans la basse vallée de **L'Yères**, la lame d'eau excédentaire semble être plus influencée par la topographie. En amont de la basse vallée, un effet de cuvette topographie n'entraîne pas (ou très peu) de surface d'eau excédentaire (Figure 5.37). Au-delà du rehaussement topographique, la lame d'eau, la surface en eau ainsi que les volumes d'eau excédentaires sont beaucoup plus importants et tendent à se remplir à la manière d'une bassine ;
- Dans la basse vallée de **La Bresle**, les variations de lame d'eau ainsi que de surface d'eau excédentaire semblent peu évoluer en amont et dans le centre de la basse vallée. C'est principalement en aval, juste avant la zone portuaire et du clapet de régulation, où la lame d'eau excédentaire va considérablement augmenter.

Dans une première hypothèse, nous pouvons logiquement supposer que les points de concentration des écoulements sont des secteurs propices à des surfaces et volumes d'eau excédentaires. Dans une deuxième hypothèse, nous pouvons supposer que la morphologie des basses vallées va avoir un impact comme évoqué précédemment. Plus la basse vallée est étroite, plus les surfaces et les volumes d'eau excédentaire en aval seront importants. Nous pouvons voir que les lames, surfaces et volumes d'eau excédentaires sont trois fois supérieurs en aval par rapport à l'amont (Figure 5.43). Dans une troisième hypothèse, il apparaît également évident que la topographie joue un rôle essentiel dans la répartition des lames, surfaces et volumes d'eau excédentaires. S'il existe plusieurs zones de stockage des eaux déconnectées initialement entre elles (*i.e.* cuvette topographique connectée au cours d'eau), alors les zones de stockage en aval des basses vallées subiront de plus fortes variations d'eau excédentaires que les zones de cuvettes localisées en amont (Figure 5.44).

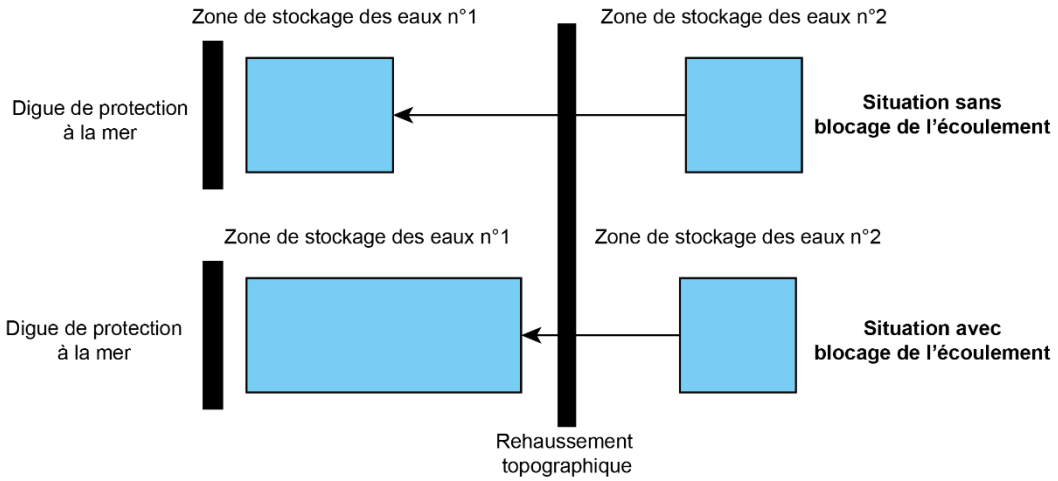


Figure 5.44 : Remplissage des zones de stockage des eaux durant une inondation avec et sans un blocage des écoulements par la mer

Pour les basses vallées larges, comprenant La Touques et La Bresle, il est plus difficile de trouver des logiques de répartition des écoulements en amont et dans le centre des basses vallées. Nous pouvons cependant supposer que la topographie ainsi que les aménagements hydrauliques présents ont un rôle important sur cette répartition.

5.5.2. Discussion et perspectives sur les effets de blocage des écoulements par la mer

Les conséquences des tempêtes Lothar (le 26 décembre 1999) et Martin (le 27 décembre 1999) dans les basses vallées du Dun, de L'Yères et de La Bresle et de la tempête Eleanor (les 3 et 4 janvier 2018) sur la basse vallée de La Touques ont été observées dans un contexte météorologique de fortes pluies (ainsi que de cumuls de pluies des jours précédents), ayant engendré des inondations fluviales. Ces inondations fluviales ont été renforcées par un blocage des écoulements par la mer, en lien avec les hauteurs d'eau en mer, les surcotes, etc. et éventuellement en lien avec des submersions marines (non intégrées à la modélisation hydraulique).

Cependant, pour chacun des événements analysés, les débordements se sont produits dans un contexte où les surcotes marines maximum ont été déphasées avec les plus hauts niveaux marins (Météo-France, 2018). Pour la tempête Lothar et Martin, les surcotes ont atteint entre 0,7 m et 1 m en Manche avec des houles de près de 8 m pour des coefficients de marée estimés à 94, mais se sont produites durant une marée descendante. La tempête Eleanor est survenue pendant une marée montante et a donc été également déphasée des plus hautes eaux en mer (coefficient de marée de 107 au Havre). Ainsi, à l'heure actuelle, les événements de référence reposent en partie sur des observations (cote NGF du plan d'eau) survenues en période de tempête, mais en déphasage avec les plus hautes eaux en mer.

À partir des travaux réalisés, dans cette thèse de doctorat, sur les effets de blocages des écoulements fluviaux par la mer, il apparaît nécessaire de s'interroger sur les possibles effets d'un blocage des écoulements par la mer, en période de tempête, en phase avec une marée de pleine mer où le maximum de surcote serait atteint. Il apparaît donc crucial de produire un modèle capable de considérer à la fois des submersions marines (par paquets de mer ou surverse) et les débordements de cours d'eau dans les basses vallées. Un modèle intégrant ces deux environnements permettrait de mieux comprendre quels pourraient être les impacts sur l'extension du champ d'inondation avec une double entrée d'eau salée et d'eau douce.

L'adaptation du modèle HEC RAS dans les basses vallées a permis de proposer une évaluation de ce qui a pu spatialement se produire, en termes de surfaces inondées et de lames d'eau, avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer lors d'évènements de tempêtes, et avec des ordres de grandeurs réalistes et validés par différentes sources (observations, cartographies). Cependant, les résultats obtenus, sur ce qui a pu se passer dans une période de concomitance, ne sont que partiels car ils n'intègrent pas l'ensemble des flux liquides présents dans la basse vallée, ni les interactions possibles entre les différentes composantes du cours d'eau (e.g. remontée de nappe et biseau salé, masse volumique, pression exercée entre les flux continentaux et marins, entrée marine par submersion, etc.).

Cette modélisation hydraulique intègre finalement assez peu de paramètres, en dehors des coefficients de rugosité, de contraction des flux, des débits et des lames d'eau pour reproduire les événements passés. Il conviendrait donc maintenant de s'orienter vers des modèles à base physique ou vers des modèles système multi-agents capables d'intégrer l'ensemble des paramètres et du comportement mécanique des fluides agissant au sein des basses vallées littorales (Reulier *et al.*, 2017 ; Becu *et al.*, 2017).

De plus, les effets de concomitance ont été analysés à partir d'une analyse statistique sur des données enregistrées à un pas de temps journalier (*cf.* Chapitre 4) et à partir d'une modélisation HEC RAS tenant compte de la valeur maximum instantanée enregistrée au droit de la station hydrologique. Les premiers essais d'analyse des concomitances en utilisant des données à un pas de temps horaire et inférieur ont cependant montré des décalages temporels entre le début

du blocage potentiel des écoulements et la réaction du cours d'eau à cet effet de blocage. Ces décalages sont particulièrement complexes, car ils diffèrent en fonction des basses vallées et de l'événement considéré.

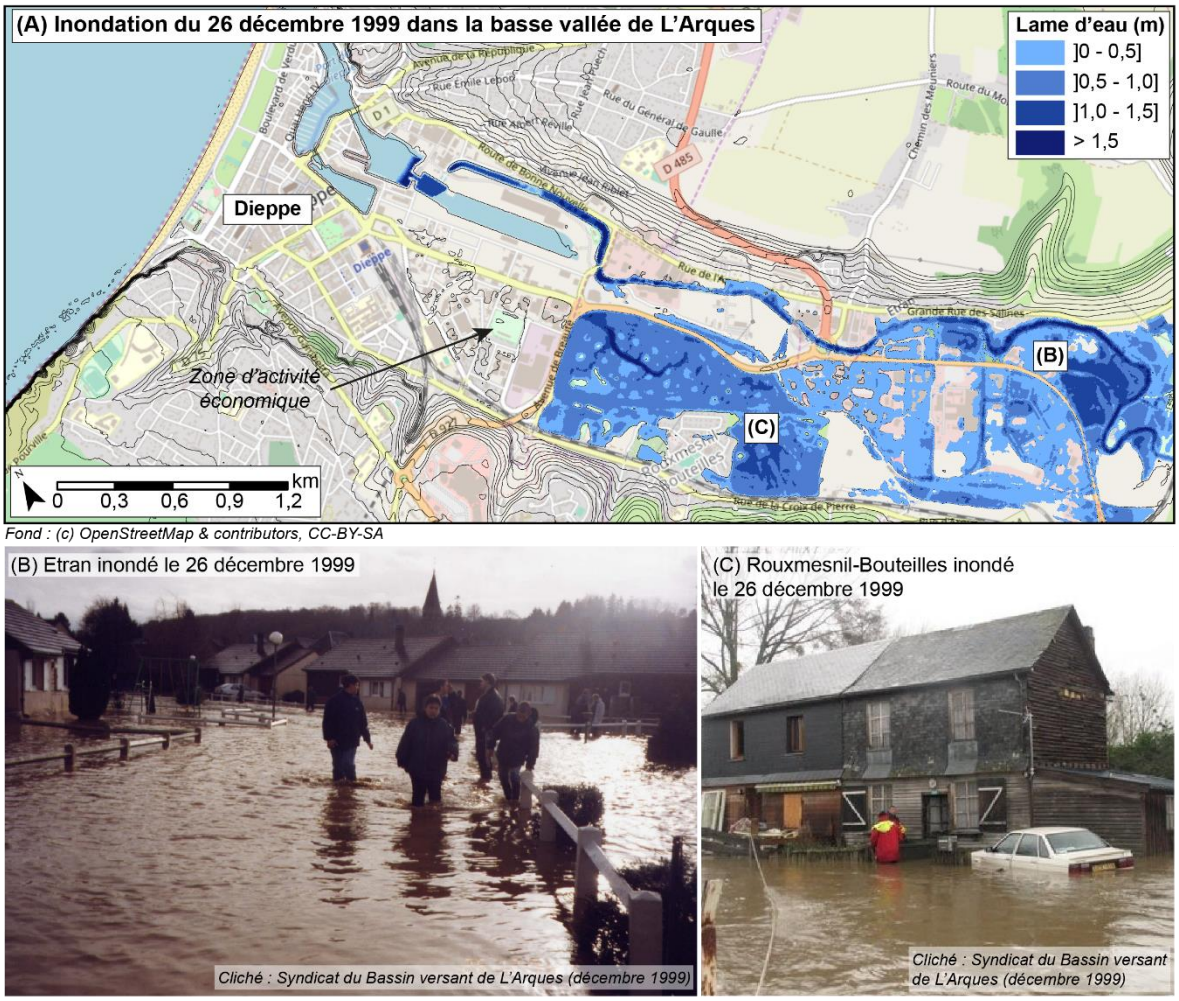
Ainsi, pour mieux modéliser et analyser ces concomitances, il serait nécessaire de pouvoir disposer de stations hydrologiques situées au plus près de l'exutoire, car rappelons que pour les quatre basses vallées analysées les stations hydrologiques sont distantes de 4 km à 13 km de l'exutoire. De même, pour mieux apprécier les gradients de blocage des écoulements par la mer en différents points des basses vallées (Larson *et al.,* 1997 ; Lopez-Tarazon, 2011), il serait particulièrement intéressant de réaliser, en plusieurs points des basses vallées, des mesures de lame d'eau, de débit et de salinité à un intervalle de temps régulier durant une marée de vives-eaux et de mortes-eaux, hors période et en période de tempête.

Mais en l'absence de stations hydrologiques, au regard des résultats obtenus avec le modèle HEC RAS, ce type de simulation serait pertinent pour être répliqué sur des bassins non jaugés (e.g. basse vallée de L'Arques) afin de donner des ordres de grandeur sur les potentiels effets de blocage des écoulements par la mer en cas de concomitance.

En cas d'absence d'information sur les lames d'eau excédentaires, et afin de simuler physiquement ce potentiel blocage des écoulements par la mer, un barrage peut être intégré à l'exutoire en laissant filtrer une certaine quantité d'eau pendant une durée correspondant au temps de blocage avant et après la pleine mer et en tenant compte d'une éventuelle surcote. Ainsi, et seulement à titre exploratoire, une modélisation hydraulique avec HEC RAS a été réalisée sur la basse vallée de L'Arques pour tenter de reproduire les surfaces inondées et les lames d'eau occasionnées par le blocage des écoulements par la mer, lors de la tempête Lothar du 26 décembre 1999 (Figure 5.45 – A).

Les informations transmises par le Syndicat mixte du port de Dieppe indiquent qu'un blocage des écoulements fluviaux s'opère lorsqu'une cote de + 5,50 m (NGF) est atteinte au niveau du port (présence d'un clapet de régulation). En temps normal, cette cote est atteinte durant une période de 4 heures (2 heures avant et après la pleine mer). Les informations recueillies par les scientifiques et le Syndicat mixte du port de Dieppe indiquent que la durée de blocage simulée est similaire à celle observée le 26 février 1990 durant la tempête Viviane et Wiebke. La durée de blocage durant cette tempête s'est élevée à environ ~ 5 heures (2,5 heures avant et après la pleine mer) en raison d'une importante surcote. Les résultats de la modélisation hydraulique apparaissent assez cohérents avec les informations recueillies auprès des scientifiques et du Syndicat du Bassin Versant de L'Arques[9]. Les lames d'eau observées dans le centre-ville d'Etran sont de l'ordre de 40 à 50 cm (Figure 5.45 – B) alors que les résultats de la modélisation sont de l'ordre de 40 à 60 cm. À Rouxmesnil-Bouteilles, l'eau est montée en moyenne de 50 cm à 1 m correspondant à la modélisation hydraulique présentée (Figure 5.45 – C). Des témoignages indiquent que les surfaces inondées ne se sont pas étendues au-delà de l'hippodrome de Dieppe en raison d'une importante digue transversale à la vallée.

[9] *Disponible sur : https://www.bvarques.fr/*



(A) Modélisation hydraulique des inondations du 26 décembre 1999 ; (B) Centre-ville d'Etran inondé le 26 décembre 1999 (cliché issu du Syndicat mixte du bassin versant de L'Arques, 26 décembre 1999) ; Pavillon inondé à Rouxmesnil-Bouteilles le 26 décembre 1999 (cliché issu du Syndicat mixte du bassin versant de L'Arques, 26 décembre 1999).

Figure 5.45 : Modélisation hydraulique d'un blocage des écoulements sur la basse vallée de L'Arques (non jaugée) lors de la tempête Lothar du 26 décembre 1999

Aujourd'hui, les modèles numériques ne peuvent intégrer à la fois l'hydraulique fluviale et l'hydraulique marine. Cependant, les résultats obtenus avec la modélisation HEC RAS ont montré qu'il était possible de reproduire assez fidèlement les débordements de cours d'eau survenus dans les basses vallées en période de concomitance (inondation et tempête). Dans un contexte d'élévation du niveau marin (Costa, 1997 ; Laignel *et al.,* 2010), où les prévisions du GIEC tendent à estimer une élévation du niveau marin allant jusqu'à + 1 m à l'horizon 2100 en Manche, il est plus que probable que l'élévation du niveau marin aura pour conséquence d'augmenter la fréquence, mais également l'intensité, des effets de blocage des écoulements fluviaux par la mer (concomitance hydrologique). Par conséquent, et seulement à titre exploratoire, nous avons voulu voir ce que pourrait donner une inondation en considérant + 1 m d'élévation du niveau marin pour de vastes vallées littorales telles que La Bresle.

Pour cela, nous avons utilisé les valeurs observées à la station hydrologique de Pont-et-Marais le 27 décembre 1999 en lien avec la tempête Martin que nous avons déjà présentées dans la section 5.4.4.2. Afin de reproduire un blocage avec + 1 m d'élévation du niveau marin, nous avons simplement augmenté la hauteur d'eau du bassin de rétention de + 1 m dans la zone

portuaire de Criel-sur-Mer et Mers-les-Bains. Pour rappel, si nous n'intégrons pas ces bassins de rétention dans la géométrie des modèles, les cours d'eau auraient tout l'espace nécessaire pour s'écouler au-delà de la basse vallée.

Un **blocage des écoulements fluviaux par la mer avec + 1 m d'élévation** du niveau marin, pour une situation hydrologique et météorologique identique à la tempête Martin le 27 décembre 1999, engendrait approximativement **180 hectares d'eau supplémentaire** dans la basse vallée de La Bresle (Figure 5.46). Cette surface d'eau supplémentaire correspondrait à un apport supplémentaire de **840 milliers de m³ d'eau**. Selon les données obtenues par cette modélisation, le secteur le plus touché serait la zone industrielle « les Prés Salés » situé entre Eu et Mers-les-Bains. Cette zone serait particulièrement exposée, car elle est située au point de rencontre de l'ensemble des drains hydrauliques (La Bresle, La Busine (au nord), le canal d'Eu à la mer (au sud) et l'ancien canal de Penthièvre (plus au sud)).

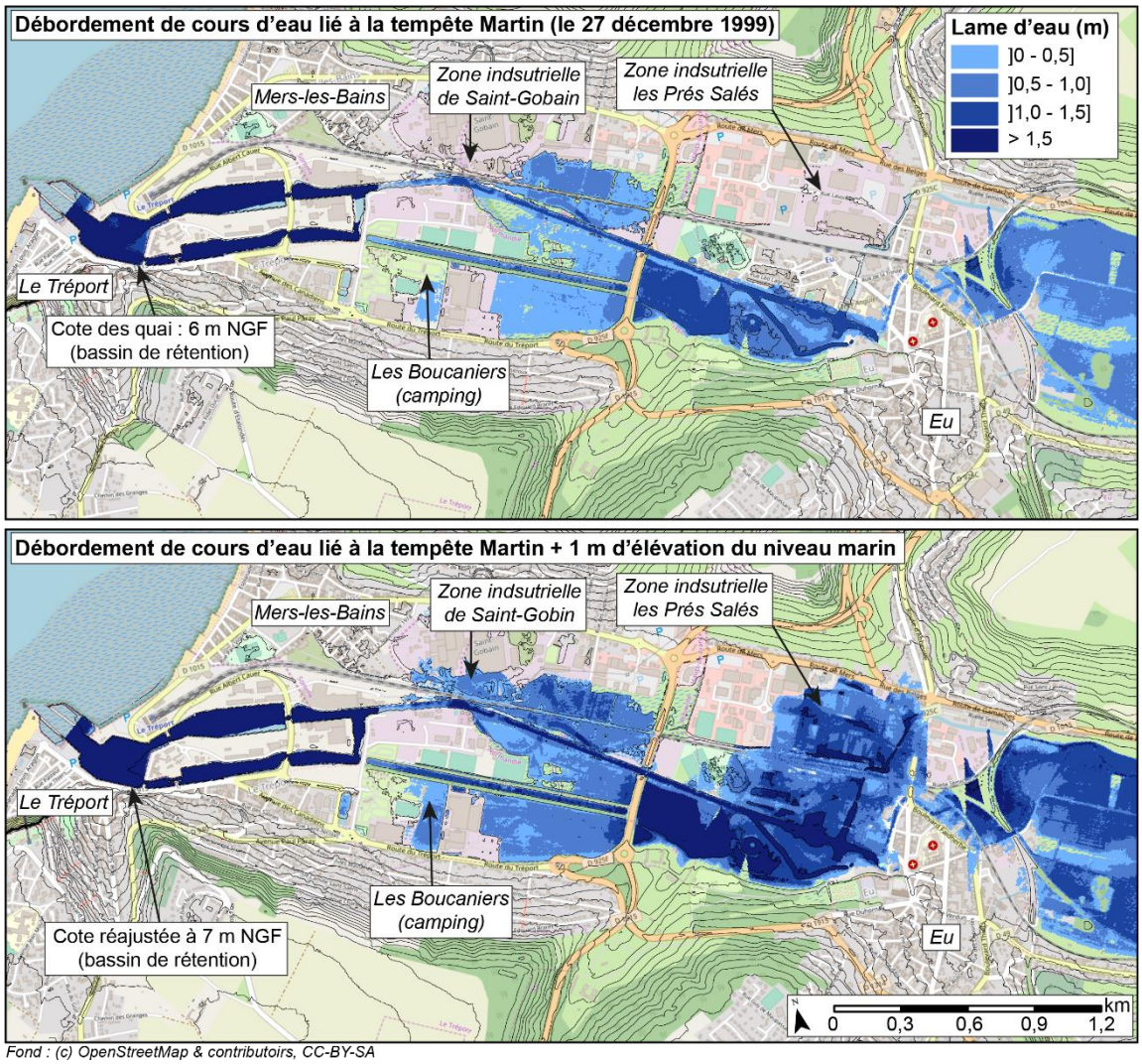


Figure 5.46 : Modélisation hydraulique d'un blocage des écoulements avec + 1 m d'élévation du niveau marin pour une situation identique au débordement du 27 décembre 1999 (tempête Martin) sur la basse vallée de La Bresle

Ce point de rencontre forme un coude, comme nous pouvons le voir au nord de la commune d'Eu (Figure 5.46). Lorsque l'eau arrive à une certaine hauteur au niveau de ce coude (point de rencontre des drains), la zone industrielle se retrouverait alors sous les eaux. Entre la zone

industrielle, les Prés Salés et l'exutoire de la basse vallée, les surfaces en eau seraient plus importantes, mais resteraient assez limitées par la topographie. La zone industrielle de Saint-Gobain se retrouverait ainsi en grande partie sous les eaux ainsi qu'une partie du camping les Boucaniers plus au sud.

Ainsi, un blocage des écoulements fluviaux par la mer risque de devenir plus fréquent avec l'élévation du niveau marin projeté (+ 1 m à l'horizon 2100), avec pour conséquence des effets directs traduits par des débordements plus fréquents des cours d'eau dans les basses vallées affectant des surfaces en eau de plus en plus importantes. Il apparaît donc inévitable d'aborder les effets de concomitance sous une dimension propre à la mécanique des fluides et qui serait alors complémentaire avec une vision statistique et géographique.

5.6. Conclusion du chapitre sur les effets de blocage des écoulements par la mer

L'objectif de ce chapitre était de modéliser des débordements de cours d'eau observés avec un blocage des écoulements fluviaux par la mer (à partir de données observées à une station hydrologique) et sans un blocage des écoulements fluviaux par la mer (prédiction faite à partir de modèles de régression – *cf.* chapitre 4). Cette modélisation n'intègre pas les apports d'eau issus des submersions marines. Notre analyse de l'effet de blocage des écoulements fluviaux repose sur cette différente situation avec et sans blocage et nous avons choisi de modéliser les événements en lien avec les plus importants débordements de cours d'eau. Pour chacune de ces quatre basses vallées, les plus hauts débordements de cours d'eau ont coïncidé avec des tempêtes majeures (Tableau 5.16).

Tableau 5.16. Etat des cours d'eau et de la part de blocage des écoulements durant les plus importantes inondations concomitantes à des tempêtes majeures dans les basses vallées d'étude

	Lame d'eau (m)	*Part de blocage (%)*
BV de La Touques (Eleanor : 3 et 4 janvier 2018)	2,31	3
BV Du Dun (Lothar : 26 décembre 1999)	1,04	15
BV de L'Yères (Lothar : 26 décembre 1999)	1,09	33
BV de La Bresle (Martin : 27 décembre 1999)	1,08	39

Une marge d'erreur a pu être estimée en considérant d'une part, les cotes NGF du plan d'eau fournies par les cartographies réalisées dans le cadre de l'élaboration des PPR ainsi que d'autre part, des témoignages issus des archives. Ces informations ont été synthétisées sous la forme de points de contrôle permettant d'estimer les différences par rapport à la modélisation HEC RAS. Toutes basses vallées confondues, 28 points de contrôle ont été comparés aux résultats de modélisation HEC RAS et une marge d'erreur de 14 cm a été estimée. Les plus importantes marges d'erreur se retrouvent près des zones portuaires où les interactions entre le cours d'eau et la mer sont les plus importantes. En se focalisant sur ces points, on observe une différence moyenne de 20 cm qui pourrait alors être issue de l'apport des submersions marines durant la tempête.

Étant donné que les événements considérés ne sont pas systématiquement les mêmes pour chacune des basses vallées, nous avons calculé des ordres de grandeur en faisant le rapport entre la surface d'eau excédentaire avec la lame d'eau excédentaire et nous avons suivi une logique similaire pour les volumes d'eau excédentaires. Avant toute chose, nous rappelons que

ces résultats ne sont valables qu'en période de débordement des cours d'eau. Ainsi, les basses vallées de La Touques et de La Bresle présentent de fortes sensibilités aux effets de blocage des écoulements en période de débordement du cours d'eau étant donné que pour 1 cm de lame excédentaire c'est environ 0,65 hectare de surface d'eau et 4 000 m³ de volumes d'eau supplémentaire. Pour les basses vallées du Dun et de L'Yères, pour 1 cm de lame d'eau excédentaire, ce sont 0,14 hectare et 2 000 m³ d'eau supplémentaire.

À travers ces valeurs, nous pouvons montrer, comme on pouvait un peu s'y attendre, que les grandes basses vallées (à fond long et large) apparaissent plus sensibles à un effet de blocage des écoulements que les basses vallées à fond étroit et de courte longueur. La **morphologie** ne serait cependant pas le seul élément responsable des effets de blocage puisque nous pouvons supposer également, sans pouvoir actuellement le démontrer, que **l'orientation** doit jouer un rôle sur l'effet de blocage des écoulements étant donné que cette même orientation influence nettement l'impact des submersions marines. Nous avions émis l'hypothèse, dans le chapitre 4, que certains **aménagements hydrauliques** avaient probablement un rôle sur le blocage des écoulements. Bien qu'il soit encore difficile de comprendre dans quelle proportion, il apparaît évident que des clapets de régulation font office de barrage temporaire des écoulements car ils se ferment à marée montante.

En subdivisant les basses vallées en **trois unités hydrologiques (amont, centre, aval),** nous avons pu constater que les lames d'eau, surfaces en eau et volumes d'eau excédentaires étaient jusqu'à trois fois supérieures aux lames d'eau excédentaires en amont des basses vallées. Au sein même de ces sous-unités hydrologiques, nous avons pu constater que les aménagements hydrauliques et la topographie avaient un rôle important sur la répartition des surfaces et des volumes d'eau excédentaires. A chaque point de concentration des flux, généralement localisés sur les levées ou près des levées transversales, les lames d'eau excédentaires sont plus importantes. Les surfaces et volumes d'eau excédentaires vont principalement évoluer dans des secteurs de cuvettes topographiques. Lorsque plusieurs cuvettes topographiques sont présentes dans une basse vallée, ce sont les cuvettes localisées au plus près de la mer qui tendre à se remplir comme des bassines et remonter progressivement la basse vallée.

La modélisation hydraulique avec HEC RAS permet une reproduction assez simple d'événements concomitants. Cette concomitance est reproduite à travers un effet de blocage de l'écoulement fluvial par la mer, ayant contribué à un débordement du cours d'eau et à l'inondation, en plus de l'effet lié à la crue elle-même. Toutefois, nous avons bien conscience des limites de son utilisation et gardons bien en tête que les valeurs calculées pour les lames d'eau, les surfaces en eau, la part du blocage des écoulements par la mer, ne sont que des ordres de grandeur, mais qui finalement apparaissent assez réalistes compte tenu des vérifications opérées.

Ainsi, il devient aujourd'hui nécessaire d'engager des recherches pour développer une modélisation qui puisse prendre en compte, plus précisément, ces effets de concomitance à travers l'utilisation de modèles à base physique ou de systèmes multi-agents. Cette analyse spatiale et temporelle des effets de concomitance doit être abordée transversalement grâce à la mécanique des fluides (comportement des flux de l'embouchure à l'amont de la basse vallée), aux analyses statistiques (influence des conditions météorologiques, marines, etc. sur la réponse de la lame d'eau) et à l'analyse géomorphologique (interprétation spatiale des effets de concomitance). Ces analyses nécessitent par conséquent plus de données et davantage de stations hydrologiques à l'embouchure des basses vallées afin de pouvoir intégrer le temps de réaction du bassin à un effet de blocage des écoulements, des submersions marines avec une entrée marine et des interactions entre les flux d'eau d'origines fluviales et marines.

Conclusion générale

Rappel du contexte et des objectifs de la recherche

Le travail de recherche a été réalisé sur les littoraux normands, notamment sur les côtes à falaises affectées par une dynamique régressive importante compte tenu de leurs caractéristiques morphostructurales et du contexte hydrodynamique actuel. En effet, de par leur nature marno-calcaire à argilo-crayeuse, meuble ou cohérente, ces falaises sont affectées par de multiples processus marins et continentaux, et par conséquent, par d'importants mouvements de versant aboutissant à des retraits annuels décimétriques. Ces falaises sont également entrecoupées par des vallées sèches ou drainées, plus ou moins perchées et souvent occupées par les populations côtières et leurs activités. Ces débouchés de vallées, ou valleuses sont également exposés à divers aléas hydrologiques tels que les submersions marines, les inondations continentales et crues turbides.

Ainsi, ces territoires côtiers à risques sont soumis à des aléas multiples et potentiellement concomitants, à la fois littoraux (érosion et submersion) et continentaux (inondation par débordement, crues turbides, mouvements de versants). Cette situation peut parfois imposer la nécessité de prévoir la relocalisation des personnes et des biens, notamment dans un contexte de changements environnementaux et sociétaux globaux. Il était donc très intéressant de s'interroger sur les impacts futurs et l'évolution de ces processus sur les sociétés pour répondre à la fois à des préoccupations scientifiques de compréhension de la dynamique des littoraux et à une demande sociétale forte, en particulier de la part des gestionnaires des territoires et des risques côtiers.

Dans ce contexte, il s'avère nécessaire, d'une part, d'adopter une démarche multi-aléas et multirisques tenant compte de la concomitance spatiale ou temporelle de plusieurs aléas et de leurs possibles effets en cascades et d'autre part, d'évaluer les impacts multisectoriels engendrés par les différents aléas.

Ce travail de thèse, tout comme le projet ANR RICOCHET, s'est appuyé sur trois sites d'étude affectés par de multiples processus marins et continentaux (blocage des écoulements fluviaux par la mer, ruissellement concentré et mouvements de terrain, etc.) et présentant des enjeux socio-économiques importants et plus ou moins vulnérables selon les phénomènes naturels considérés. Par ailleurs, de nombreuses données étaient déjà disponibles sur ces trois sites sélectionnés à l'embouchure de rivières littorales : de Auberville à Pennedepie (site n°1), de Quiberville à Dieppe (site n°2) et de Criel-sur-Mer à Ault (site n°3).

Afin de contribuer à l'analyse et à la cartographie multirisques de ces territoires côtiers, nous nous sommes fixés deux principaux objectifs :

1) Le premier objectif s'articulait autour d'un développement méthodologique pour l'évaluation et l'analyse des **conséquences potentielles** en considérant l'ensemble des éléments exposés au sein d'un territoire d'étude. Ces conséquences ont été évaluées à travers une approche multiscalaire, grâce à l'utilisation de modèles d'intégration et d'une adaptation de méthodes orientées « indices » ;
2) Le second objectif portait sur **les effets des concomitances hydrologiques** (plus précisément sur les situations de hautes eaux en rivières et de hautes eaux en mer). Deux

approches ont été menées successivement pour analyser ces effets (lame d'eau excédentaire et extension spatiale) : une analyse statistique (régressive) de chroniques hydrologiques, climatiques et marines et une modélisation hydraulique pour spatialiser ces effets à l'échelle de quelques basses vallées.

Évaluation et analyse des enjeux par une approche multiscalaire

(1) Le développement méthodologique d'une analyse des conséquences potentielles par une approche multiscalaire.

Le premier objectif était de décrire, quantifier et évaluer les conséquences potentielles sur des territoires côtiers. Traditionnellement, ces conséquences potentielles sont analysées au sein de zones d'aléa connues mais dans le cadre d'une analyse multirisques, nous avons développé une méthode permettant de s'affranchir de l'analyse (multi-) aléas. Cette analyse a donc nécessité :

1) La **caractérisation des éléments exposés** (à de multiples phénomènes hydrologiques et/ou gravitaires) sur l'ensemble des territoires à travers la constitution d'une base de données géographique intégrant **différents degrés de précision** (Graff *et al.*, 2019b) ;
2) Le **calcul de conséquences potentielles** en tenant compte à la fois de la valeur des éléments exposés et de leur localisation par rapport à des secteurs sujets à des inondations, des mouvements terrain ou les deux réunis (Graff *et al.*, 2019a).

La **caractérisation des éléments exposés** doit pouvoir s'adapter aux besoins des utilisateurs en considérant plusieurs degrés de précision. **Trois échelles** ont ainsi été déterminées auxquelles nous avons ajusté la précision géométrique et le nombre de critères intégrés sur la base d'une synthèse bibliographique :

- À une *échelle moyenne* (1 : 50 000ème – 1 : 25 000ème), les éléments exposés ont été définis grâce des primitives géométriques avec degré de généralisation important et un unique critère d'analyse ;
- À une *échelle large* (1 : 25 000ème – 1 : 10 000ème), les éléments exposés ont été définis à partir des infrastructures (forte précision) et avec un à trois critères d'analyses afin de décrire la vulnérabilité physique (corporelle), fonctionnelle et structurelle ;
- À *l'échelle locale* (1 : 10 000ème – 1 : 2 000ème), les éléments exposés ont été définis à partir de la structure des bâtiments (forte précision) et avec cinq critères d'analyses.

Afin d'obtenir le degré de précision voulu à chacune de ces échelles, nous avons utilisé de nombreuses bases de données géographiques. **Deux modèles d'harmonisation** des bases de données ont alors été élaborés et adaptés aux échelles spatiales.

Le **modèle MSA (*Medium scale analysis*)** à une échelle moyenne présente de très faibles marges d'erreur inférieures à 10 % (validité des résultats de 93 %). Il apporte une première description des surfaces bâties, des réseaux de transports et d'énergies, des zones urbaines ainsi que des surfaces agricoles et naturelles. Il est rapide à mettre en œuvre étant donné qu'un seul critère d'analyse est considéré et que l'on dégrade l'information à travers une *approche par Upscaling* (*i.e.* une simplification de l'information).

Le **modèle LSA *(large and local scale analysis)*** à une échelle large et locale présente de faibles marges d'erreur comprises entre 10 à 15 %. Il fournit une information détaillée sur les bâtiments et les réseaux de transports et d'énergie à travers la fonction, le type, la population estimée (ou le trafic pour les réseaux) ainsi que le nombre de voies pour les réseaux de transport. Par contre,

il est assez long à mettre en œuvre étant donné que plusieurs critères d'analyses sont intégrés pour préciser les infrastructures et la structure des bâtiments, selon une *approche par Downscaling* (*i.e.* une complexification de l'information).

Par la suite, les modèles MSA et LSA permettent une mise à jour rapide des éléments exposés. Pour ce qui est de la **transposabilité des modèles à différents territoires**, en supposant les bases de données identifiées et acquises, l'adaptation du modèle MSA a nécessité en moyenne entre 2 à 4 jours et l'adaptation du modèle LSA a nécessité en moyenne entre 4 à 7 jours de travail.

L'évaluation des **conséquences potentielles**, a nécessité une adaptation de méthodes orientées « indices » (dites expertes) à un environnement littoral. Le modèle **APC (Attribution Pondération Combinaison)** ainsi développé repose sur une attribution de valeurs à des éléments exposés grâce à une méthode de *ranking* selon leur importance sur le territoire.

Un **double système de pondération** a ensuite été élaboré afin de mettre en avant ou d'exclure certains éléments exposés de l'analyse. À une échelle moyenne, les indices sont réajustés en fonction de **leur importance pour le territoire**. À une échelle d'analyse large et locale, les indices sont réajustés **en fonction de leurs localisations** par rapport à un secteur pouvant être sujet à des phénomènes naturels (glissements de terrain, inondation et superposition des deux phénomènes).

La dernière étape du modèle APC est **une combinaison linéaire des critères** permettant d'obtenir les résultats de conséquences potentielles (conséquences globales à une échelle moyenne, conséquences sur les infrastructures à une échelle large et conséquences sur la structure des bâtiments à une échelle locale) et de mettre en évidence les différents secteurs concernés par ces conséquences selon les classes (faible à très forte).

Ces trois échelles spatiales et ces trois types de conséquences sont donc complémentaires, car ils apportent chacun un niveau de résolution ainsi qu'un degré d'information adapté à différents objectifs. À une échelle moyenne, les **conséquences globales** apportent une première estimation des *hotspots* sur le territoire, mais la résolution est insuffisante pour distinguer les infrastructures. Cette information est donc complétée par **l'analyse des infrastructures** à une échelle large. À l'échelle locale, il est possible de mieux distinguer les **conséquences potentielles sur la structure** des différents bâtiments, et de mieux les différencier les uns des autres selon la classe de conséquences considérée.

Finalement, les conséquences potentielles calculées grâce au modèle APC sont **facilement intégrables à des analyses de risques** aux trois échelles spatiales. Les résultats peuvent être intégrés directement sous forme d'indice (valeurs semi-quantitatives) si les cartes d'aléas sont également sous forme d'indices ou bien peuvent être intégrées après discrétisation (fort, moyen, faible, etc.) à des cartes d'aléas utilisant une approche experte et un système d'évaluation qualitatif.

(2) Quels sont les principaux intérêts et limites à la caractérisation des éléments exposés et l'évaluation des conséquences potentielles par une approche multiscalaire ?

Une **approche multiscalaire** des conséquences potentielles permet d'adapter les données à la résolution des cartes d'aléas fournies. Cependant, le processus initial d'intégration des éléments exposés et d'évaluation des conséquences est forcément plus long et complexe à mettre en place qu'une analyse à une seule et même échelle. Les éléments considérés et la précision des données

pour chacune des échelles spatiales peuvent alors créer des débats selon les affinités ou les objectifs des utilisateurs.

L'utilisation de **multiples bases de données** permet un gain de temps considérable pour analyser les conséquences potentielles sur un territoire possédant une forte urbanisation. Cette approche requiert moins de moyens techniques et humains qu'une acquisition des données uniquement faite sur le terrain, mais nécessite cependant une harmonisation pour qu'elles puissent être exploitables. **Un contrôle de la qualité** de ces données est également crucial pour déterminer un degré de confiance dans les informations utilisées et cette étape peut être particulièrement longue dans le cas de communes avec d'importants centres urbains où il peut exister une utilisation mixte des bâtiments.

Le **modèle APC** évite l'utilisation de mêmes critères d'analyses pour évaluer différents types de conséquences potentielles afin de simplifier la lecture des résultats finaux. Cependant, diminuer le nombre de critères augmente automatiquement le poids des critères restant à l'analyse et donc la part de subjectivité initiale.

Un **système de pondération spatial** a été développé afin de pouvoir s'affranchir initialement des cartes d'aléas et se focaliser sur des secteurs potentiellement sujets à des phénomènes naturels. Ces systèmes de pondérations spatiaux possèdent l'avantage d'être ajustables selon les environnements et une transposabilité relativement aisée (choix du degré de pente, choix de la zone tampon utilisée autour de ces pentes, etc.) mais ils ne constituent qu'une étape intermédiaire dans l'analyse des risques.

Un des principaux intérêts de ce développement méthodologique concerne sa **reproductibilité sur les différents sites d'étude**. Si les bases de données existent et sont déjà harmonisées sur un site, l'évaluation des conséquences potentielles sera relativement rapide. Il est préférable de considérer au minimum plusieurs communes pour l'évaluation des conséquences potentielles étant donné que la phase d'attribution repose sur un classement. Si peu d'éléments de comparaison sont disponibles (e.g. absence de centre de soin, de commerce, etc.), le classement aura tendance à surévaluer des éléments qui, dans d'autres circonstances, auraient un classement plus faible.

Analyse et quantification des concomitances hydrologiques

(1) Le second apport de ce travail de thèse était de développer une méthodologie pour mettre en évidence et quantifier les effets des concomitances hydrologiques (lame d'eau et extension spatiale) liés aux blocages des écoulements fluviaux par la mer dans les embouchures.

À partir d'une approche historique des concomitances basée sur des enquêtes, sur diverses archives (départementales, nationales, presse, …), sur des chroniques de données hydrologiques et sur des inventaires de bases de données publiques et académiques, nous avons pu montrer que différents types de concomitances pouvaient se produire sur ces territoires côtiers. Puis, nous nous sommes focalisés sur les concomitances hydrologiques à travers **deux approches** :

1) Une **analyse statistique (régression linéaire multiple)** de chroniques de données hydrologiques, météorologiques et marégraphiques pour estimer les **lames d'eau excédentaires**, c'est-à-dire les hauteurs d'eau supplémentaires engendrées par les conditions marines ;

2) Une **modélisation hydraulique** (sous HEC RAS) pour rejouer spatialement des événements concomitants et donc reproduire **les champs d'extension des inondations avec et sans blocage** des écoulements fluviaux par la mer (*i.e.* la surface et le volume d'eau excédentaire).

Ainsi, dans le détail, l'analyse statistique visait à mieux **comprendre** et à **quantifier** les **effets de blocage par la mer,** en termes de lame d'eau excédentaire. Les informations contenues dans les différentes chroniques de données ont alors été intégrées dans des **modèles de régression linéaires multiples (RLM)** afin de déterminer une lame d'eau excédentaire sur quatre embouchures littorales (La Touques, Le Dun, L'Yères et La Bresle). En considérant l'intégralité des chroniques hydrologiques sans distinction, les premiers résultats et analyses se sont révélés peu concluants et nous ont amené à devoir filtrer l'information afin de mieux faire ressortir l'influence des variables marines :

- Un **premier tri a été réalisé à partir d'une analyse en composante principale (ACP) des chroniques** en ne retenant que les données correspondant à **des situations potentiellement propices à un blocage** des écoulements par la mer (lame d'eau des rivières et hauteur d'eau en mer élevée) et ayant entraîné ou non une inondation (ce tri conduit à retenir qu'environ 10 % des données initiales) ;
- Un **second tri a été réalisé en retenant les situations d'inondation**, c'est-à-dire les dates pendant lesquelles se sont produites des inondations ayant engendré ou non des dommages (ce tri conduit à retenir moins de 1 % des données initiales, ce qui représente selon les embouchures entre 18 à 35 événements seulement).

Ainsi, en ne retenant que les dates où se sont produites des inondations, les modèles de régression n'avaient pas assez d'échantillons pour que les modèles de régression puissent être considérés comme fiables (et nous n'avons donc pas poursuivi les analyses avec ces seules données).

Par contre, il apparaît que les résultats issus des ACP ont permis de faire bien ressortir la contribution des variables avec une bonne explication du coefficient de détermination (R^2) et de faibles erreurs quadratiques (RMSE). Ainsi, les **résultats issus de ces modèles de régression RLM** ont montré que :

- Les embouchures ayant les **plus fortes lame d'eau excédentaires** sont **L'Yères et La Bresle** avec des lames d'eau moyennes respectivement de 37 cm (Max = 43,5 cm et Min = 29,9 cm) et de 24,8 cm (Max = 30,9 cm et Min = 15,1 cm) tandis que **La Touques et Le Dun présentent des lames d'eau excédentaires moyennes plus faibles** respectivement de 5 cm (Max = 8,9 cm et Min = 2,9 cm) et de 4 cm (Max = 4,8 cm et Min = 2,4 cm). Par ailleurs et en moyenne, le blocage des écoulements correspond à 20 % de la lame d'eau totale (Max = 39 % et Min = 7 %) ;
- Ces valeurs ne peuvent être retenues sans prendre en considération le fait que les **modèles de régression** ont été appliqués sur des chroniques de données hydrologiques provenant de stations hydrologiques qui sont parfois grandement éloignées des exutoires, avec des distances variant de 4 à 6 km (Le Dun, L'Yères et La Bresle) à 13 km pour La Touques. Ainsi, il est probable que les valeurs de lames d'eau excédentaires puissent être plus importantes aux exutoires.

À partir de ces analyses, nous avons ensuite cherché à hiérarchiser les embouchures et les tempêtes selon l'effet de blocage des écoulements (indice complémentaire à celui proposé par Météo France) à partir d'une **mise en indice ICH (Indice de concomitance hydrologique)**. L'analyse des indices ICH calculés sur les embouchures permet d'abord de vérifier que les résultats obtenus permettent de retrouver la même hiérarchie que celle obtenue dans l'analyse portant sur les lames d'eau excédentaires. Ensuite, nous avons pu déterminer les indices ICH pour huit tempêtes majeures identifiées en Manche (Eleanor, Egon, Dagmar, etc.).

Cette classification des embouchures et des tempêtes selon les effets de blocage des écoulements montrerait que les embouchures n'ont pas toutes la même sensibilité aux effets de blocage et que les tempêtes engendrent de plus importants effets de blocage (comme on pouvait *a priori* sans douter). L'analyse des tempêtes majeures, permet de montrer que :

- Une **même tempête n'aura pas le même impact sur toutes les embouchures**. Pour exemple la plus importante tempête sur La Touques est Egon (12 janvier 2017) avec un indice ICH de 0,16 (+ 9 cm) tandis que sur L'Yères la tempête Eleanor est la plus importante avec un indice ICH de 0,99 (+ 43 cm) ;
- Les **tempêtes vont avoir des impacts différents au sein d'une même embouchure**. Pour exemple la lame d'eau excédentaire était de 30 cm sur La Bresle durant la tempête Eleanor (3 et 4 janvier 218) et de 25 cm durant la tempête Dirk (22 décembre 2013).

Il apparait que les tempêtes majeures ayant engendré les plus importantes lames d'eau excédentaires ont une direction moyenne des vents comprise entre 270° et 320°, avec des pressions atmosphériques comprises entre 970 et 980 hPa et les coefficients de marée supérieurs à 100. Ces effets de blocages révèlent donc une certaine complexité à la fois spatiale et temporelle et l'on peut dès lors supposer qu'il existe des effets de sites (orientation de la vallée, hauteur locale des vagues, etc.) et une influence anthropique (présence ou non d'aménagements). Une modélisation hydraulique a par conséquent été réalisée afin de compléter ces analyses statistiques.

La **modélisation hydraulique à l'échelle des basses vallées** a servi à reproduire les champs d'extension des inondations avec et sans blocage des écoulements fluviaux par la mer grâce au modèle HEC RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*). La modélisation hydraulique réalisée avec HEC RAS est une modélisation simplifiée des flux liquides ne prenant pas en compte tous les paramètres habituellement intégrés dans les modélisations hydrauliques à base physique utilisées dans le cadre des aménagements ou de la cartographie des aléas. Cependant, à défaut de modèles permettant de coupler des flux de deux origines différentes, le modèle HEC RAS offre la possibilité d'intégrer des aménagements hydrauliques et donc de filtrer ou de bloquer les écoulements fluviaux. Mais cette modélisation n'intègre pas les apports d'eau issus des submersions marines.

La modélisation hydraulique s'appuie sur une série de profils en travers élaborés sur la base du modèle numérique de terrain RGE Alti à une résolution de 5 m (IGN). Grâce aux modes d'occupation des sols élaborés avec les modèles d'harmonisation (chapitre 2), des paramètres de rugosités, de contraction et d'expansion des flux ont été retenus. Les berges, levées et aménagements ont par la suite été intégrés aux profils en travers.

Le paramétrage de la géométrie de la modélisation hydraulique a été appliqué sur les basses vallées de La Touques, du Dun, de L'Yères et de La Bresle aux dates pour lesquelles les **plus hautes lames d'eau avec débordements ont été observées durant une situation de tempête** : la **tempête Eleanor** des 3 et 4 janvier 2018 pour **La Touques**, la **tempête Lothar** du

26 décembre 1999 pour **Le Dun** et **L'Yères,** la **tempête Martin** du 27 décembre 1999 pour **La Bresle.**

Les effets de concomitance correspondent à la différence entre une situation où un blocage des écoulements est avéré (données observées) et une situation qui aurait dû se produire sans un blocage des écoulements par la mer (données modélisées).

Pour **l'extension spatiale et les volumes**, les résultats des modèles hydrauliques ont montré que les effets de blocage des écoulements par la mer engendreraient entre 1,5 ha (Le Dun) et 27 ha (La Bresle) pour des volumes d'eau excédentaires variant entre 32 000 m³ et 136 000 m³. Étant donné qu'il s'agit de tempêtes différentes avec une morphologie des vallées différentes, nous avons estimé des ordres de grandeurs en divisant la surface et volume d'eau excédentaires par rapport à la lame d'eau excédentaire. Ce rapport a montré que les basses vallées les plus affectées par les effets de blocage des écoulements sont : La Touques, La Bresle, Le Dun et L'Yères.

Pour ce qui est de **la variation de la lame d'eau sur le profil longitudinal de l'aval à l'amont**, selon les situations avec et sans blocage, la modélisation hydraulique a permis de montrer que, selon les basses vallées, les écarts pouvaient être assez homogènes et de seulement quelques centimètres ou bien plus irréguliers et élevés en atteignant plusieurs dizaines de centimètres.

Ensuite et seulement à titre exploratoire, nous avons réalisé une modélisation hydraulique sur **une basse vallée non jaugée**. Ainsi, la reconstitution de l'inondation concomitante avec la tempête Lothar (26 décembre 1999) pour la basse vallée de L'Arques a montré des résultats cohérents avec les observations de terrain et les données d'archives.

De même, **un blocage des écoulements avec + 1 m d'élévation du niveau marin** a été reproduit sur la basse vallée de La Bresle pour des conditions similaires à celles du 27 décembre 1999 (tempête Martin). Cette situation de blocage a été reproduite en ajustant les contraintes des aménagements hydrauliques à l'exutoire. Le blocage des écoulements avec + 1 m d'élévation du niveau marin engendrerait potentiellement 180 ha d'eau supplémentaires et 840 milliers de m³ d'eau. Une augmentation de + 1 m du niveau marin tendra à rendre des situations actuellement qualifiées comme exceptionnelles en des situations plus courantes (plus grande fréquence des débordements, …).

(2) Quelles sont les principaux enseignements à retenir de ces analyses sur les effets de blocage des écoulements par la mer ?

Par essence, les rivières littorales subissent une influence de la mer surtout en domaine méga tidale, comme la mer de La Manche. Le blocage des écoulements est variable selon les basses vallées, les tempêtes, les surcotes, le phasage ou déphasage temporel entre le pic de marée et le passage de la tempête, etc. L'analyse croisée des résultats obtenus sur les quatre basses vallées étudiées met en évidence plusieurs facteurs responsables des effets de blocage.

Comme on peut un peu s'y attendre, la **morphologie des basses vallées** doit avoir un rôle. Les grandes basses vallées (à fond long et large) apparaissent plus sensibles à un effet de blocage des écoulements que les basses vallées à fond étroit et de courte longueur. La morphologie ne serait cependant pas le seul élément responsable des effets de blocage puisque nous pouvons supposer également, sans pouvoir actuellement le démontrer, que **l'orientation** doit jouer un rôle sur l'effet de blocage des écoulements étant donné que cette même orientation influence nettement l'impact des submersions marines. Une vallée orientée vers le quart nord-ouest est plus exposée aux tempêtes et donc aux vagues et vitesses des courants de marée, qu'une vallée orientée plein

nord (e.g. Le Dun) ou au quart nord-est. Il est cependant difficile de comprendre dans quelle proportion cette orientation va influencer le blocage. Cela nécessiterait des analyses complémentaires sur les directions moyennes des houles à l'exutoire de chaque bassin et sur l'influence locale (présence d'épis, taille du cordon de galets, etc.). **Les aménagements hydrauliques** à l'exutoire apparaissent avoir un rôle sur le blocage des écoulements. Bien qu'il soit encore difficile de comprendre dans quelle proportion, il apparaît évident que les clapets de régulation font office de barrage temporaire des écoulements car ils se ferment à marée montante. Par exemple, pour la basse vallée de La Bresle, le clapet engendrerait une augmentation d'environ 20 cm de la lame d'eau excédentaire.

En subdivisant les basses vallées en **trois unités hydrologiques (amont, centre, aval**), nous avons pu constater que les lames d'eau, surfaces en eau et volumes d'eau excédentaires étaient jusqu'à trois fois supérieurs aux lames d'eau excédentaires en amont des basses vallées. Au sein même de ces sous-unités hydrologiques, nous avons pu constater que les aménagements hydrauliques et la topographie avaient un rôle important sur la répartition des surfaces et des volumes d'eau excédentaires. A chaque point de concentration des flux, généralement localisés sur les levées ou près des levées transversales, les lames d'eau excédentaires sont plus importantes. Les surfaces et volumes d'eau excédentaires vont principalement évoluer dans des secteurs de cuvettes topographiques. Lorsque plusieurs cuvettes topographiques sont présentes dans une basse vallée, ce sont les cuvettes localisées au plus près de la mer qui tendent à se remplir comme des bassines et à remonter progressivement la basse vallée.

Au final, la modélisation hydraulique avec HEC RAS permet une reproduction assez simple d'événements concomitants. Cette concomitance a été reproduite à travers un effet de blocage de l'écoulement fluvial par la mer, ayant contribué à un débordement du cours d'eau et à l'inondation, en plus de l'effet lié à la crue elle-même. Toutefois, nous avons bien conscience des limites de son utilisation et gardons bien en tête que les valeurs calculées pour les lames d'eau, les surfaces en eau, la part du blocage des écoulements par la mer, ne sont que des ordres de grandeur, mais qui finalement apparaissent assez réalistes compte tenu des vérifications opérées.

Perspectives : apport de ces travaux de recherche à une analyse multirisque

Dans le cas d'une analyse multirisques, la phase de recherche et d'analyse des aléas est particulièrement longue et une **évaluation des conséquences potentielles doit être menée en parallèle et indépendamment des aléas**. La méthode développée dans ce travail de thèse le permet et se comprend comme une étape intermédiaire à une analyse des risques à travers l'utilisation de systèmes de pondération spatiaux. Le développement récent de plateformes de données géographiques (e.g. Géoportail urbanisme, Carmen, Géolittoral, etc.) permet aujourd'hui de disposer d'informations, de grande qualité à des résolutions suffisantes, pour caractériser plus facilement **l'ensemble des éléments exposés** présents sur un site et donc d'intégrer des enjeux pouvant être impactés par l'évolution des zones d'aléas en lien avec les changements climatiques.

Une analyse multirisque est par définition complexe et nécessite un **système d'évaluation commun entre les aléas et les conséquences potentielles** afin qu'ils puissent être comparés et combinés. Un système d'évaluation purement quantitatif (type courbe de dommage) peut être complexe à mettre en place dans le cas où les effets d'interaction et de rétroaction des aléas sont considérés. Une simplification est donc requise et l'utilisation de valeurs d'indice (approche semi-quantitative) pour l'évaluation des aléas et des conséquences potentielles semble être le

meilleur compromis entre une information trop générale (qualitative) et une information trop complexe (quantitative). Couplée à cette utilisation d'indice, **plusieurs échelles spatiales** pour l'évaluation des enjeux permettent de **s'adapter aux multiples analyses des aléas**.

Couplée à ce développement méthodologique, l'analyse sur les **concomitances hydrologiques** doit apporter de nouveaux éléments de réflexions sur l'analyse et la cartographie multi-aléas. Contrairement à une « simple » superposition des aléas, ces analyses sur les concomitances hydrologiques (blocage des écoulements fluviaux par la mer) proposent d'aller plus loin en considérant des interactions entre les différents phénomènes. Ces analyses sont cependant une clé d'entrée à la cartographie multi-aléas mais nécessiteraient des analyses complémentaires sur l'intensité des concomitances, leur période de retour et scénarios d'évolution.

De plus, **l'étude porte sur un seul type de concomitance hydrologique** : les interactions entre le débordement d'un cours d'eau et d'un haut niveau marin. Pour que cette analyse sur les concomitances hydrologiques soit complète, il serait nécessaire d'évaluer les concomitances entre les débordements et le ruissellement, entre le ruissellement et le déclenchement de mouvement de terrain, etc.

Dans un contexte où il est avéré que le niveau marin sera de + 1 m à l'horizon 2100, il devient crucial de s'interroger dès à présent sur les **conséquences à long terme pour les basses vallées de durée et d'intensité de blocage des écoulements augmentés,** sur les impacts futurs et sur les conséquences potentielles. L'analyse sur les effets de blocage des écoulements fluviaux par la mer, couplée à des phénomènes tels que le ruissellement, le recul des côtes, etc., permettrait également d'informer les acteurs et décideurs locaux sur le besoin de réfléchir à des solutions durables dans un contexte où l'ensemble des phénomènes naturels extrêmes type inondation par les rivières, par la mer, risque de s'intensifier et de devenir plus fréquent.

Si les analyses proposées sont une première estimation sur les concomitances hydrologiques, il convient maintenant d'adapter ces résultats aux analyses multi-aléas. *In fine*, les analyses sur les concomitances et conséquences potentielles doivent être intégrées à terme dans une plateforme multirisque (*Coastal Multirisk Platform* – CMP) comme celle développée dans un environnement SIG par le BRGM. Cette plateforme doit permettre d'identifier les *hotspots*, c'est-à-dire les conséquences potentielles très fortes localisées dans des zones d'aléas. Une solution de relocalisation des biens et des personnes devrait alors s'opérer à travers une analyse des secteurs à densifier (relocalisation à court terme), des zones à urbaniser correspondant à la réserve foncière des communes (relocalisation à moyen terme) et de la consommation des espaces agricoles et naturels dans des secteurs à l'abri des aléas (relocalisation à long terme).

Bibliographie

A

Abbas, H.B., Routray, J.K., 2013. A semi-quantitative risk assessment model of primary health care service interruption during flood: Case study of Aroma locality, Kassala State of Sudan. International Journal of Disaster Risk Reduction 6, 118–128. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2013.10.002

Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connel, P., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the european hydrological system, "SHE" .1 : History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. Journal of hydrology 87, 45–59.

Abdulrazzak, M., Elfeki, A., Kamis, A., Kassab, M., Alamri, N., Chaabani, A., Noor, K., 2019. Flash flood risk assessment in urban arid environment: case study of Taibah and Islamic universities' campuses, Medina, Kingdom of Saudi Arabia. Geomatics, Natural Hazards and Risk 10, 780–796. https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1545705

Abdulrazzak, M., Elfeki, A., Kamis, A.S., Kassab, M., Alamri, N., Noor, K., Chaabani, A., 2018. The impact of rainfall distribution patterns on hydrological and hydraulic response in arid regions: case study Medina, Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences 11. https://doi.org/10.1007/s12517-018-4043-z

Abuodha, P.A.O., Woodroffe, C.D., 2010. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. Journal of Coastal Conservation 14, 189–205. https://doi.org/10.1007/s11852-010-0097-0

Adger, W.N., Dessai, S., Goulden, M., Hulme, M., Lorenzoni, I., Nelson, D.R., Naess, L.O., Wolf, J., Wreford, A., 2009. Are there social limits to adaptation to climate change? Climatic Change 93, 335–354. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9520-z

Afshari, S., Tavakoly, A.A., Rajib, M.A., Zheng, X., Follum, M.L., Omranian, E., Fekete, B.M., 2018. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. Journal of Hydrology 556, 539–556. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036

Aggett, G.R., Wilson, J.P., 2009. Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river. Geomorphology 113, 21–34. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.034

Ahiablame, L., Shakya, R., 2016. Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. Journal of Environmental Management 171, 81–91. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036

Akbas, S.O., Blahut, J., Sterlacchini, S., 2009. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows 6.

Akkala, A., Devabhaktuni, V., Kumar, A., 2010. Interpolation techniques and associated software for environmental data. Environmental Progress & Sustainable Energy 29, 134–141. https://doi.org/10.1002/ep.10455

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 58, 21–44. https://doi.org/10.1007/s100640050066

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage 56, 15.

Alnedawy, F., El-Mewafi, M., Zeidan, Z., 2015. Flood Hazard evaluation and Water Harvesting Estimation in South Sinai by using Remote Sensing and GIS Techniques, case study (Dahab and Kid valleys) 6, 8.

Altenbach, T., 1995. A comparison of risk assessment techniques from qualitative to quantitative. Presented at the In: ASME pressure and piping conference, Honolulu, Hawaii, p. 25.

Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant: processus, facteurs, modèles. H.G.A, Bucarest.

Ambrosi, C., Strozzi, T., Scapozza, C., Wegmüller, U., 2018. Landslide hazard assessment in the Himalayas (Nepal and Bhutan) based on Earth-Observation data. Engineering Geology 237, 217–228. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.020

Amine, A., Ait Daoud, R., Bouikhalene, B., 2016. Efficiency Comparaison and Evaluation between Two ETL Extraction Tools. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 3, 174. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v3.i1.pp174-181

Andersen, O., Thomsen, C., Torp, K., 2018. SimpleETL: ETL Processing by Simple Specifications., in: DOLAP.

Angelopoulos, N.V., Cowx, I.G., Buijse, A.D., 2017. Integrated planning framework for successful river restoration projects: Upscaling lessons learnt from European case studies. Environmental Science & Policy 76, 12–22. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.06.005

Armaş, I., Ionescu, R., Gavriş, A., Toma-Danila, D., 2016. Identifying seismic vulnerability hotspots in Bucharest. Applied Geography 77, 49–63. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.10.001

Arrighi, C., Rossi, L., Trasforini, E., Rudari, R., Ferraris, L., Brugioni, M., Franceschini, S., Castelli, F., 2018. Quantification of flood risk mitigation benefits: A building-scale damage assessment through the RASOR platform. Journal of Environmental Management 207, 92–104. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.017

Astriani, W., Trisminingsih, R., 2016. Extraction, Transformation, and Loading (ETL) Module for Hotspot Spatial Data Warehouse Using Geokettle. Procedia Environmental Sciences 33, 626–634. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.117

Audebert, N., Le Saux, B., Lefèvre, S., 2016. Semantic segmentation of earth observation data using multimodal and multi-scale deep networks, in: Asian Conference on Computer Vision. Springer, pp. 180–196.

Auzet, A.V., Malet, J.P., Maquaire, O., 2005. Aléa naturel à l'origine des" coulées de boue (Note interne rédigée à l'attention du BRGM, non publiée).

Aven, T., 2011. On risk governance deficits. Safety Science 49, 912–919. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.02.015

Azad, S.P., Morinaga, R., Kobayashi, H., 2018. Effect of Housing Layout and Open Space Morphology on Residential Environments–Applying New Density Indices for Evaluation of Residential Areas Case Study: Tehran, Iran. Journal of Asian Architecture and Building Engineering 17, 79–86. https://doi.org/10.3130/jaabe.17.79

B

Baize, S., 1998. Tectonique, eustatisme et climat dans un système géomorphologique côtier. Le Nord-Ouest de la France au Pléistocène : exemple du Cotentin (Normandie) (Thèse de Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Banos, A., Sanders, L., 2013. Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie. Modéliser & simuler. Sous la dir. de F. Varenne et M. Silberstein. Edition Matériologiques 2, 2.

Barbolini, M., Cappabianca, F., Sailer, R., 2004. Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment. Risk Analysis IV 533–542.

Barlow, J., Childerhouse, P., Gann, D., Hong-Minh, S., Naim, M., Ozaki, R., 2003. Choice and delivery in housebuilding: lessons from Japan for UK housebuilders. Building research & information, Spon Press 31, 134–145. https://doi.org/DOI: 10.1080/0961321031000083931

Bates, P.D., De Roo, A.P.J., 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of Hydrology 236, 54–77. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X

Bathrellos, G.D., Skilodimou, H.D., Chousianitis, K., Youssef, A.M., Pradhan, B., 2017. Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. Science of The Total Environment 575, 119–134. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.025

Batstone, C., Lawless, M., Tawn, J., Horsburgh, K., Blackman, D., McMillan, A., Worth, D., Laeger, S., Hunt, T., 2013. A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines. Ocean Engineering 71, 28–39. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.003

Baud, P., Bourgeat, S., Bras, C., 2008. Dictionnaire de géographie. Hatier, Paris.

Beckers, E., Degré, A., 2011. Revue bibliographique : la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 9.

Becu, N., Amalric, M., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Delay, E., Long, N., Marilleau, N., Pignon-Mussaud, C., Rousseaux, F., 2017. Participatory simulation to foster social learning on coastal flooding prevention. Environmental Modelling & Software 98, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.003

Bell, R., Glade, T., 2004. Quantitative risk analysis for landslides – Examples from B´ıldudalur, NW-Iceland 15.

Bellos, V., 2012. Ways for flood hazard mapping in urbanised environments: A short literature review. Water Utility Journal 4, 25–31.

Bellos, V., Tsakiris, G., 2015. Comparing Various Methods of Building Representation for 2D Flood Modelling In Built-Up Areas. Water Resources Management 29, 379–397. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0702-3

Bendjoudi, H., Hubert, P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. Hydrological Sciences Journal 47, 921–930. https://doi.org/10.1080/02626660209493000

Benediktsson, J.A., Swain, P.H., Ersoy, O.K., 1990. Neural Network Approaches Versus Statistical Methods In Classification Of Multisource Remote Sensing Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 28, 540–552. https://doi.org/10.1109/TGRS.1990.572944

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, Caen.

Berthier, P., Bouroche, J.-M., 1975. Analyse des Données Multidimensionnelles, PUF. ed. Paris.

Bertran, P., 2004. Dépôts de pente continentaux : Dynamique et faciès. Quaternaire Hors-série, 260.

Bertrand, J.R., 1967. Le Pays d'Auge Méridional. Formations superficielles et morphologie (DES). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Bialke, M., Rau, H., Thamm, O.C., Schuldt, R., Penndorf, P., Blumentritt, A., Gött, R., Piegsa, J., Bahls, T., Hoffmann, W., 2018. Toolbox for Research, or how to facilitate a central data management in small-scale research projects. Journal of Translational Medicine 16. https://doi.org/10.1186/s12967-018-1390-1

Bianchini, S., Solari, L., Casagli, N., 2017. A GIS-Based Procedure for Landslide Intensity Evaluation and Specific risk Analysis Supported by Persistent Scatterers Interferometry (PSI). Remote Sensing 9, 1093. https://doi.org/10.3390/rs9111093

Bignot, G., 1987. Les paléoenvironnements et les paléogéographies du Bassin de Paris au Danien, d'après les Foraminifères du Mont Aimé (Marne, France). Revue de Micropaléontologie 30, 150–176.

Biljecki, F., Heuvelink, G.B.M., Ledoux, H., Stoter, J., 2018. The effect of acquisition error and level of detail on the accuracy of spatial analyses. Cartography and Geographic Information Science 45, 156–176. https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1279986

Bird, E., 2013. Coastal geomorphology: an introduction. Wiley, Hoboken, N.J.

Birkmann, J., 2007. Risk and vulnerability indicators at different scales:Applicability, usefulness and policy implications. Environmental Hazards 7, 20–31. https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002

Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño, M.L., Barbat, A.H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., Welle, T., 2013. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. Natural Hazards 67, 193–211. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5

Birkmann, J., Welle, T., 2015. Assessing the risk of loss and damage: exposure, vulnerability and risk to climate-related hazards for different country classifications. Int. J. Global Warming 8, 191–212.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B., 2014. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters, 2nd ed. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203714775

Bock, M., Xofis, P., Mitchley, J., Rossner, G., Wissen, M., 2005. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales–Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. Journal for nature Conservation 13, 75–89.

Bol, D., Grus, M., Laakso, M., 2016. Crowdsourcing and VGI in national mapping agency's data collection 6.

Bollin, C., Hidajat, R., 2006. Community-based disaster risk index: pilot implementation in Indonesia, towards disaster resilient societies, UNU-Press. ed, Measuring vulnerability to natural hazards. Tokyo.

Bona, E., Marquetti, I., Link, J.V., Makimori, G.Y.F., da Costa Arca, V., Guimarães Lemes, A.L., Ferreira, J.M.G., dos Santos Scholz, M.B., Valderrama, P., Poppi, R.J., 2017. Support vector machines in tandem with infrared spectroscopy for geographical classification of green arabica coffee. LWT - Food Science and Technology 76, 330–336. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.048

Bouadi, T., Cordier, M.-O., Moreau, P., Quiniou, R., Salmon-Monviola, J., Gascuel-Odoux, C., 2017. A data warehouse to explore multidimensional simulated data from a spatially distributed agro-hydrological model to improve catchment nitrogen management. Environmental Modelling & Software 97, 229–242. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.019

Boughton, W., 2004. The Australian water balance model. Environmental Modelling & Software 19, 943–956. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.10.007

Brandolini, P., Cevasco, A., 2015. Geo-hydrological Risk Mitigation Measures and Land-Management in a Highly Vulnerable Small Coastal Catchment, in: Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F. (Eds.), Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5. Springer International Publishing, Cham, pp. 759–762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_147

Braud, I., Ayral, P.A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Coz, J.L., Nord, G., Vandervaere, J.P., Anquetin, S., Adamovic, M., 2014. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash-flood understanding. Hydrol. Earth Syst. Sci. 30.

Breilh, J.F., Chaumillon, E., Bertin, X., Gravelle, M., 2013. Assessment of static flood modeling techniques: application to contrasting marshes flooded during Xynthia (western France). Natural Hazards and Earth System Sciences 13, 1595–1612. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1595-2013

BRGM, 2015. Identification des zones soumises à un risque de recul majeur du trait de côte entre Dieppe et Pourville-sur-Mer (76) par investigations géophysiques.

BRGM, 2007. Inventaire des cavités souterraines de Haute-Normandie (Rapport final No. BRGM/RP-55543-FR), Phase 1, Tranche 3. BRGM.

Brovelli, M.A., Minghini, M., Molinari, M.E., Zamboni, G., 2016. Positional accuracy assessment of the openstreetmap buildings layer through automatic homologous pairs detection: the method and a case study. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B2, 615–620. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B2-615-2016

Brown, L.E., Hannah, D.M., Milner, A.M., 2007. Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. Global Change Biology 13, 958–966. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01341.x

Brown, R.G., 1988. Effects of precipitation and land use on storm runoff. Journal of the American Water Resources Association 24, 421–426. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1988.tb03001.x

Buttenfield, B.P., McMaster, R.B. (Eds.), 1991. Map generalization: making rules for knowledge representation. New York, NY : Wiley, Harlow, Essex, England : Longman Scientific & Technical.

C

Calazans Campelo, C.E., Bertolotto, M., Corcoran, P. (Eds.), 2017. Volunteered Geographic Information and the Future of Geospatial Data:, Advances in Geospatial Technologies. IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2446-5

Camarasa Belmonte, A.M., López-García, M.J., Soriano-García, J., 2011. Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. Applied Geography 31, 136–145. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.03.003

Cantat, O., Brunet, L., 2001. Discontinuité géographique et particularités climatiques en Basse-Normandie//Geographical discontinuity and climatic particularities in Basse-Normandie. Annales de Géographie 110, 579–596. https://doi.org/10.3406/geo.2001.1703

Cantat, O., Cador, J., Agasse, E., 2002. L'originalité des inondations de 2000-2001 dans la Plaine de Caen (Normandie, France). Quand la montée des nappes souterraines prolonge le débordement des rivières… / The peculiarity of the 2000-2000 floods in the "Plaine de Caen" (Normandy, France). When the rising of the ground water table relays the river's overflowing… Annales de Géographie 111, 246–264. https://doi.org/10.3406/geo.2002.1656

Cantat, O., Costa, S., Letortu, P., Savouret, E., 2012. Le rôle des facteurs atmosphériques et marins dans la genèse des submersions côtières. Exemples en Manche orientale, de Barfleur au Tréport, in: Actes Des Journées de Climatologie Du CNFG. Liège, pp. 31–48.

Cardona, D., 2004. Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People. The Need for the Rethinking the Concept of Vulnerability and Risk from Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management, in: Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People. London, pp. 37–51.

Cariam, R., 2006. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR)—cahier de recommandations sur le contenu des PPR. (Tech. rep.). Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Paris.

Cariolet, J.-M., Suanez, S., 2013. Runup estimations on a macrotidal sandy beach. Coastal Engineering 74, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.008

Carlier, B., Puissant, A., Dujarric, C., Arnaud-Fassetta, G., 2018. Upgrading of an index-oriented methodology for consequence analysis of natural hazards: application to the Upper Guil catchment (southern French Alps). Natural Hazards and Earth System Sciences 18, 2221–2239. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2221-2018

Carlier, B., Puissant, A., Dujarric, C., Arnaud-Fassetta, G., 2017. Improvement of an index oriented methodology for consequence analysis of natural hazards: application to the Upper Guil Catchment (Southern French Alps). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 25. https://doi.org/10.5194/nhess-2017-323

Carpignano, A., Golia, E., Di Mauro, C., Bouchon, S., Nordvik, J., 2009. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application. Journal of Risk Research 12, 513–534. https://doi.org/10.1080/13669870903050269

Carter, R.W.G., Orford, J.D., 1993. The Morphodynamics of Coarse Clastic Beaches and Barriers: A Short- and Long-term Perspective. Journal of Coastal Research SPECIAL ISSUE, 158–179.

Carver, S.J., 1991. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International journal of geographical information systems 5, 321–339. https://doi.org/10.1080/02693799108927858

Cascini, L., Peduto, D., Pisciotta, G., Arena, L., Ferlisi, S., Fornaro, G., 2013. The combination of DInSAR and facility damage data for the updating of slow-moving landslide inventory maps at medium scale. Natural Hazards and Earth System Sciences 13, 1527–1549. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1527-2013

Cashman, P.M., Preene, M., 2013. Groundwater lowering in construction a practical guide to dewatering. Taylor & Francis, Boca Raton, Fla.

Caspar, R., Costa, S., Lebreton, P., Letortu, P., 2010. Les submersions de tempête de la nuit du 10 au 11 mars 2008 sur la côte d'Albâtre (Haute-Normandie, France) : détermination météo-marine. Norois 115–132. https://doi.org/10.4000/norois.3273

Castillo Soto, M.E., 2012. The identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology. Applied Geography 35, 199–207. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.001

Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J., Dostal, T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. Geomorphology 122, 167–177. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011

Cerema, 2019. Dynamiques et évolution du littoral. Fascicule 3 – Synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague. Caen.

Cerema, 2018. Rapport d'activité 2018. Rouen.

Cerema, 2015. Indicateur national de l'érosion côtière. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

CETE, 2011. PPR de La Bresle Eu – Mers-les-Bains – Le Tréport : alea submersion marine.

Chadule, G., 1994. Initiation aux pratiques statistiques en géographie, Masson. ed.

Chakraborty, J., Tobin, G.A., Montz, B.E., 2005. Population Evacuation: Assessing Spatial Variability in Geophysical Risk and Social Vulnerability to Natural Hazards. Natural Hazards Review 6, 23–33. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2005)6:1(23)

Chang, K.Y., He, S.S., Chou, C.C., Kao, S.L., Chiou, A.S., 2015. Route planning and cost analysis for travelling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS. International Journal of Geographical Information Science 29, 1375–1393. https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1030672

Charlier, C., Decrop, G., 1997. De l'expertise scientifique au risque négocié : le cas du risque en montagne, Editions du Cemagref. ed. Paris.

Chen, L., van Westen, C.J., Hussin, H., Ciurean, R.L., Turkington, T., Chavarro-Rincon, D., Shrestha, D.P., 2016. Integrating expert opinion with modelling for quantitative multi-hazard risk assessment in the Eastern Italian Alps. Geomorphology 273, 150–167. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.041

Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D.T., Duan, Z., Ma, J., 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. CATENA 151, 147–160. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.032

Chen, X., Zhang, Z., Soulsby, C., Cheng, Q., Binley, A., Jiang, R., Tao, M., 2018. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: An integrated approach. Hydrological Processes 32, 2932–2946. https://doi.org/10.1002/hyp.13232

Chiesa, C., Laben, C., Cicone, R., 2003. An Asia Pacific natural hazards and vulnerabilities atlas. Presented at the In 30th international symposium on remote sensing of environment.

Ciurean, R.L., Hussin, H., van Westen, C.J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Frigerio, S., Glade, T., 2017. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. Natural Hazards 85, 929–957. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2612-6

Ciurean, R.L., Schroter, D., Glade, T., 2013. Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction, in: Approaches to Disaster Management - Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters. InTech. https://doi.org/10.5772/55538

Clark, G.E., Moser, S.C., Ratick, S.J., Dow, K., Meyer, W.B., Emani, S., Jin, W., Kasperson, J.X., Kasperson, R.E., Schwarz, H.E., 1998. Assessing the Vulnerability of Coastal Communities to Extreme Storms: The Case of Revere, MA., USA. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3, 59–82. https://doi.org/10.1023/A:1009609710795

Confuorto, P., Di Martire, D., Centolanza, G., Iglesias, R., Mallorqui, J.J., Novellino, A., Plank, S., Ramondini, M., Thuro, K., Calcaterra, D., 2017. Post-failure evolution analysis of a rainfall-triggered landslide by multi-temporal interferometry SAR approaches integrated with geotechnical analysis. Remote Sensing of Environment 188, 51–72. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.002

Cook, R., Isakov, V., Touma, J.S., Benjey, W., Thurman, J., Kinnee, E., Ensley, D., 2008. Resolving Local-Scale Emissions for Modeling Air Quality near Roadways. Journal of the Air & Waste Management Association 58, 451–461. https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.3.451

Cooke, R.M., ElSaadany, S., Huang, X., 2008. On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. Reliability Engineering & System Safety 93, 745–756. https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.017

Cooper, J.A.G., 2002. The role of extreme floods in estuary-coastal behaviour: contrasts between river-and tide-dominated microtidal estuaries. Sedimentary Geology 150, 123–137.

Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigó, J., 2003. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. Natural Hazards 30, 421–435. https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007094.74878.d3

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., Smith, J.T., 2013. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

Cortier, O., 2018. Quantification des bénéfices des revêtements perméables Modélisation à l'échelle de la structure et du bassin versant (Spécialité Génie Civil). Université de Caen Normandie, Caen.

Costa, S., 1997. Dynamique littorale et risques naturels : L'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la Baie de Seine et la Baie de Somme. Thèse de l'Université de Paris I, Paris.

Costa, S., Delahaye, D., 2002. Pérennité des plages de galets de l'espace Rives-Manche (Beach Erosion of the Rives Manche), Porgramme Européen Interreg. II. Préfecture de Haute-Normandie.

Costa, S., Delahaye, D., Freire-Diaz, S., Davidson, R., Laignel, B., Di Nocera, L., 2002. Quantification par analyse photogramétrique du recul des falaises et des apports en galets corrélatifs (Haute-Normandie, France), in: In Delahaye D., Levoy F., Maquaire O. Eds. Presented at the Symposium Geomorphology : from expert opinion to modelling, Strasbourg, pp. 205–214.

Costa, S., Delahaye, D., Freire-Diaz, S., Di-Nocera, L., Davidson, R., Plessis, E., 2004. Quantification by photogrammetric analysis of the normandy and picardy rocky coast dynamic (Normandie, France), in: Coastal Chalk Cliff Instability, Geological Society. Mortimore R.N. & Duperret A., London, pp. 139–148.

Costa, S., Delahaye, D., Letortu, P., Douvinet, J., Cantat, O., Davidson, R., 2013. Spatial coexistence and temporal logout between mainland and marine hazards in Upper Normandy (NW France). Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria 53–61. https://doi.org/10.4461/GFDQ.2013.36.4

Costa, S., Freire-Diaz, S., Di Nocera, L., 2001. Le littoral haut-normand et picard : une gestion concertée. Annales de Géographie 117–135.

Costa, S., Gueben-Veniere, S., Goeldner-Gianella, L., Mercier, D., 2015. Mouvements de la surface des mers et des océans et conséquences à l'interface Terre-mer, in: Géographie Des Mers et Des Océans. Nicolas Escach.

Costa, S., Lageat, Y., Hénaff, A., Delahaye, D., Plessis, E., 2003. Origine de la variabilité spatiale du recul des falaises crayeuses du nord-ouest du Bassin de Paris. L'exemple du littoral haut-normand (France). Hommes et Terres du Nord 1, 22–31. https://doi.org/10.3406/htn.2003.2832

Costa, S., Le Coeur, C., Lageat, Y., 2007. Vers la quantification du budget sédimentaire des plages de galets du littoral haut-normand., in: Du Continent Au Bassin Versant. Théories et Pratiques En Géographie Physique. Hommage Au Professeur Alain Godard. Clermont-Ferrant, p. 592.

Costa, S., Maquaire, O., Letortu, P., Thirard, G., Compain, V., Roulland, T., Medjkane, M., Davidson, R., Graff, K., Lissak, C., Delacourt, C., Duguet, T., Fauchard, C., Antoine, R., In press. Sedimentary coastal cliffs of Normandy: Modalities and quantification of retreat. Journal of Coastal Research, Coastal Education and Research Foundation 88.

Covello, V.T., Mumpower, J., 1985. Risk Analysis and Risk Management: An Historical Perspective. Risk Analysis 5, 103–120.

Créach, A., 2016. Cartographie et analyse économique de la vulnérabilité du littoral atlantique français face au risque de submersion marine (Thèse de Géographie). Université de Nantes, Nantes.

Crowley, H., Pinho, R., Polidoro, B., van Elk, J., 2017. Developing fragility and consequence models for buildings in the Groningen field. Netherlands Journal of Geosciences 96, s247–s257. https://doi.org/10.1017/njg.2017.36

Crozier, M.J., 1999. Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group 24, 825–833.

Crozier, M.J., Glade, T., 2005. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach, in: Landslide Hazard and Risk. Wiley, Chichester, pp. 1–40.

Cruden, D.M., Fell, R., 1997. Estimating the risks from landslides using historical data. Landslide Risk Assessment 177–184.

Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J., 2008. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. Global Environmental Change 18, 598–606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013

Cutter, S.L., Boruff, B.J., Shirley, W.L., 2003. Social Vulnerability to Environmental Hazards*. Social Science Quarterly 84, 242–261. https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002

D

Daniel, G., Sunyé, G., Benelallam, A., Tisi, M., Vernageau, Y., Gómez, A., Cabot, J., 2017. NeoEMF: A multi-database model persistence framework for very large models. Science of Computer Programming 149, 9–14. https://doi.org/10.1016/j.scico.2017.08.002

DDTM 14, 2016. Plan de prévention des risques d'inondation de la basse vallée de La Touques (Note de présentation). Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Caen.

DDTM 14, 2007. Plan de Prévention des Risques "Mouvements de Terrain" intercommunal de Trouville-sur-Mer, Villerville et Cricquebœuf (Caractérisation des aléas). Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement.

DDTM 76, 2016. Plan de Prévention des Risques Littoraux etd'Inondation du bassin versant de L'Arques et de la Scie. Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Rouen.

DDTM 76, 2011. Plan de prévention des risques naturels de la vallée de l'ARQUES. Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Rouen.

DDTM 76, 2010. Plan de Prévention des Risques d'Inondation de la vallée du Dun (Rapport de présentation). Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL).

DDTM 76, 2009. Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Dieppe. Ministère de la Transition écologique et solidaire, Rouen.

DDTM 80, 2018. Plan de prévention des risques naturels basse vallée de La Bresle. Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Amiens.

De Roo, A.P.J., Jetten, V.G., 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. CATENA 37, 477–493. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00034-X

de Brito, M.M., Evers, M., 2016. Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. Natural Hazards and Earth System Sciences 16, 1019–1033. https://doi.org/10.5194/nhess-16-1019-2016

Defossez, S., Vinet, F., Leone, F., 2017. Assessing Vulnerability to Flooding: Progress and Limitations, in: Floods. Elsevier, pp. 241–257. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-268-7.50014-6

DEFRA, 2005. Securing the benefits—the joint UK response to the Prime Minister's Strategy Unit Net Benefits Report on the future of the fishing industry in the UK. Welsh Assembly Group Scottish Executive, Department for Agriculture and Rural Development, London, London.

DEFRA, 2002. Safeguarding our seas: a strategy for the conservation and sustainable development of our marine environment. Welsh Assembly Group Scottish Executive, Department for Agriculture and Rural Development, London, London.

Delahaye, D., 2003. Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture : analyse spatiale d'un phénomène complexe (From concentrated runoff to flash flood in silty loamy plateaux : spatial analysis of a complex phenomena). Bulletin de l'Association de géographes français 80, 287–301. https://doi.org/10.3406/bagf.2003.2336

Delahaye, D., 2002. Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie: Modélisation et approche multiscalaire des risques (Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)). Université de Rouen, Rouen.

Delahaye, D., Douvinet, J., Langlois, P., 2010. Le bassin versant: de l'unité spatiale aux sous-unités fonctionnelles In Weisbuch et Zwirn : Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires. Vuibert Ed 301–328.

Delahaye, D., Guermond, Y., Langlois, P., 2001. Spatial interaction in the runoff process. Presented at the Proc. of the 12th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, St Valéry en Caux.

Delattre, A., Garancher, T., Rozencwajg, C., Touret, T., 2002. Jurisque - prévention des risques naturels (Tech. Rep. 3). Ministere de l'écologie et du développement durable, Paris.

Delmas, M., Cerdan, O., Cheviron, B., Mouchel, J.-M., Eyrolle, F., 2012. Sediment export from French rivers to the sea: FRENCH SEDIMENT EXPORTS. Earth Surface Processes and Landforms 37, 754–762. https://doi.org/10.1002/esp.3219

Delmonaco, G., Margottini, C., Spizzichino, D., 2006. ARMONIA methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps. ARMONIA.

D'Ercole, R., Gluski, P., Hardy, S., Sierra, A., 2009. Vulnérabilités urbaines dans les pays du Sud. Présentation du dossier. Cybergeo. https://doi.org/10.4000/cybergeo.22022

D'Ercole, R., Thouret, J.-C., Dollfus, O., Asté, J.-P., 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. Revue de géographie alpine 82, 87–96. https://doi.org/10.3406/rga.1994.3776

Desmare, S., Nicolle, A., 2012. Hydrodynamique côtière : modélisation des courants de marée au SHOM. Editions Paralia, pp. 31–40. https://doi.org/10.5150/jngcgc.2012.004-D

Deumlich, D., Schmidt, R., Sommer, M., 2010. A multiscale soil-landform relationship in the glacial-drift area based on digital terrain analysis and soil attributes. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173, 843–851. https://doi.org/10.1002/jpln.200900094

Devillers, R., Jeansoulin, R., 2006. Spatial Data Quality: Concepts, in: Devillers, R., Jeansoulin, R. (Eds.), Fundamentals of Spatial Data Quality. ISTE, London, UK, pp. 31–42. https://doi.org/10.1002/9780470612156.ch2

Dewez, T.J.B., Rohmer, J., Regard, V., Cnudde, C., 2013. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val (Normandy, northern France). Journal of Coastal Research 65, 702–707. https://doi.org/10.2112/SI65-119.1

DGPR, 2009. Zones basses, Zones à risque naturel. Ministère de la Transition écologique et solidaire.

Dilley, M., 2005. Natural disaster hotspots: a global risk analysis, Disaster risk management series. World Bank, Washington, D.C.

Dimakos, X.K., Aas, K., 2004. Integrated risk modelling. Statistical Modelling: An International Journal 4, 265–277. https://doi.org/10.1191/1471082X04st079oa

Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., 2016. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. Journal of Hydrology 534, 478–492. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020

Doh, J.P., Bunyaratavej, K., Hahn, E.D., 2009. Separable but not equal: The location determinants of discrete services offshoring activities. Journal of International Business Studies 40, 926–943. https://doi.org/10.1057/jibs.2008.89

Douglas, J., 2007. Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences 7, 283–288. https://doi.org/10.5194/nhess-7-283-2007

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 Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

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). Norois 17–30. https://doi.org/10.4000/norois.1733

Douvinet, J., Delahaye, D., 2010. Caractéristiques des « crues rapides » du nord de la France (Bassin parisien) et risques associés. Géomorphologie : relief, processus, environnement 16, 73–90. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7829

Douvinet, J., Delahaye, D., Langlois, P., 2005. Catchment morphgology and dynamics of hyper-concentrated stream flows on loamy plateaux (Basin Paris, in the North-Westren part of France), in: Poster Au Sixth International Conference on Geomorphology on "Geomorphology in Regions of Environmental Contrasts." Presented at the IGG, Zaragoza, Espagne.

Douvinet, J., Mallet, F., Escudier, A., Delahaye, D., Christol, A., 2015a. La simulation comme outil d'anticipation des crues rapides dans les petits bassins versants en Seine-Maritime. Revue Internationale de Géomatique 25, 99–122. https://doi.org/10.3166/RIG.25.99-122

Douvinet, J., Planchon, O., Cantat, O., Delahaye, D., Cador, J.-M., 2009. Variabilité spatio-temporelle et dynamique des pluies de forte intensité à l'origine des « Crues Rapides » dans le bassin parisien (France). Climatologie. https://doi.org/10.4267/climatologie.511

Douvinet, J., Van De Wiel, M.J., Delahaye, D., Cossart, E., 2015b. A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling. Natural Hazards 75, 2905–2929. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1470-3

Dowling, C.A., Santi, P.M., 2014. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. Natural Hazards 71, 203–227. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0907-4

DREAL Normandie, 2019. Profil environnemental de La Normandie. DREAL, Lieu de publication inconnu.

DREAL Normandie, 2016. L'atlas de Normandie. Ministère de la Transition écologique et solidaire.

DREAL Normandie, 2015. Profil environnemental de la Basse Normandie: Les repères de territoire : Le climat : L'air : L'eau : La biodiversité : Les sols : Les sous-sols et la géodiversité : La mer et le littoral : Les paysages. DREAL, Lieu de publication inconnu.

DREAL Normandie, 2012. Les risques majeurs du Calvados, Dossier départemental. Ministère de la Transition écologique et solidaire, Caen.

DREAL Haute Normandie, 2011. Etude sur la sensibilité et sur l'adaptation de la Haute-Normandie aux effets du changement climatique. Rapport réalisé par Explicit et SAFEGE, 96 p.

DREAL Basse Normandie, 2010. Etude sur l'adaptation au changement climatique en Basse Normandie., Météo-France et DREAL BN. Missions SOCRATE.

DREAL Normandie, 2004. Prédisposition aux mouvements de terrain (glissements de pente, coulées de boue et fluage). Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Caen.

Drobne, S., Lisec, A., 2009. Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. Informatica 33.

Du, S., Zhang, F., Zhang, X., 2015. Semantic classification of urban buildings combining VHR image and GIS data: An improved random forest approach. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 105, 107–119. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.011

Ducharne, A., Habets, F., Deque, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Page, J., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiery, D., Terray, L., Viennot, P., Boe, J., Bourqui M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J., 2009. Rapport final du projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, 62 p.

Dugué, O., 2007. Le Massif armoricain dans l'évolution mésozoïque et cénozoïque du nord-ouest de l'Europe : contrôles tectonique, eustatique et climatique d'un bassin intracratonique (Normandie, mer de la Manche, France) (Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)). Université de Rennes, Rennes.

Dugué, O., Fily, G., Rioult, M., 1998. Le Jurassique des côtes du Calvados: biostratigraphie, sédimentologie, paléoécologie, paléogéographie et stratigraphie séquentielle. ulletin trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre 85, 3–132.

Duncan, M., Edwards, S., Kilburn, C., Twigg, J., Crowley, K., 2016. An interrelated hazards approach to anticipating evolving risk, in: GFDRR (Ed.) (Ed.), The Making of a Riskier Future: How Our Decisions Are Shaping Future Disaster Risk. Washington USA, pp. 114–121.

Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., Giraud, A., 2002. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. Natural Hazards and Earth System Science 2, 15–26. https://doi.org/10.5194/nhess-2-15-2002

Dutta, D., Herath, S., Musiake, K., 2000. Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. Hydrological Processes 14, 497–519.

E

Eckert, S., Jelinek, R., Zeug, G., Krausmann, E., 2012. Remote sensing-based assessment of tsunami vulnerability and risk in Alexandria, Egypt. Applied Geography 32, 714–723. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.003

EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 An indicator-based report. European Environment Agency, Copenhagen.

Eidsvig, U.M.K., Kristensen, K., Vangelsten, B.V., 2017. Assessing the risk posed by natural hazards to infrastructures. Natural Hazards and Earth System Sciences 17, 481–504. https://doi.org/10.5194/nhess-17-481-2017

El Morjani, Z.E.A., Ebener, S., Boos, J., Abdel Ghaffar, E., Musani, A., 2007. Modelling the spatial distribution of five natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk as a step towards the reduction of the health impact related to disasters. International Journal of Health Geographics 6, 8. https://doi.org/10.1186/1476-072X-6-8

Eleutério, J., Hattemer, C., Rozan, A., 2013. A systemic method for evaluating the potential impacts of floods on network infrastructures. Natural Hazards and Earth System Sciences 13, 983–998. https://doi.org/10.5194/nhess-13-983-2013

Elhaï, H., 1963. La Normandie occidentale entre la Seine et le golfe normand-breton. Etude morphologique. L'Information Géographique 27, 180–182.

Equilbey, E., Barrière, C., Choutier, J.-P., Monteiro, E., 2003. Inventaire préliminaire des cavités souterraines du Calvados (î4) - Basse-Normandie (Etat d'avancement). BRGM.

Ernoul, L., Wardell-Johnson, A., Willm, L., Béchet, A., Boutron, O., Mathevet, R., Arnassant, S., Sandoz, A., 2018. Participatory mapping: Exploring landscape values associated with an iconic species. Applied Geography 95, 71–78. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.013

Ernst, J., Dewals, B.J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M., 2010. Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. Natural Hazards 55, 181–209. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y

Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A.-F., Thouret, J.-C., Manville, V., Negulescu, C., Zuccaro, G., De Gregorio, D., Nardone, S., Uchuchoque, J.A.L., Arguedas, A., Macedo, L., Manrique Llerena, N., 2016. Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. Journal of Hydrology 541, 563–581. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017

Evin, G., Eckert, N., Hingray, B., Morin, S., Verfaillie, D., Lafaysse, M., Blanchet, J., 2019a. La statistique, une boîte à outils complète pour quantifier l'incertitude – Application aux projections climatiques en zone de montagne. https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2019.2.19

Evin, G., Wilhelm, B., Jenny, J.-P., 2019b. Flood hazard assessment of the Rhône River revisited with reconstructed discharges from lake sediments. Global and Planetary Change 172, 114–123. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.09.010

Evrard, Y., 1987. Les déterminants des consommations culturelles. Economie et Culture : les outils de l'économiste à l'épreuve 125–136.

F

Fan, H., Huang, H., 2008. Response of coastal marine eco-environment to river fluxes into the sea: A case study of the Huanghe (Yellow) River mouth and adjacent waters. Marine Environmental Research 65, 378–387. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2008.01.003

Farrokh, N., Zhongqiang, L., 2013. Framework for Multi-risk Assessment (MATRIX project (Contract n 265138) No. Deliverable 5.2).

Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., Leroi, E., 2005. A framework for landslide risk assessment and management, in: Landslide Risk Management. Oldrich Hungr, Robin Fell, Rejean Couture, Erik Eberhardt, Canada, p. 24.

FEMA, 2007. FEMA library - HAZUS-MH MR3 patch 2, FEMA library. Federal Emergency Management Agency.

Fichaut, B., Suanez, S., 2007. Plage fuyante à Trielen 12.

Fisson, C., Leboulenger, F., Lecarpentier, T., Moussard, S., Ranvier, G., 2014. L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution (Fascicule Seine-Ava No. 3.1).

Fisson, C., Lemoine, J.P., 2016. Les niveaux d'eau en estuaire de Seine : risque inondation et changement climatique (Fascicule Seine-Aval No. 3.5). GIP Seine-Aval.

Flageollet, J.C., 1989. Les Mouvements de terrain et leur prévention, Masson Éditions. ed, Collection Géographie. Paris.

Flanagan, B.E., Gregory, E.W., Hallisey, E.J., Heitgerd, J.L., Lewis, B., 2011. A Social Vulnerability Index for Disaster Management. Journal of Homeland Security and Emergency Management 8. https://doi.org/10.2202/1547-7355.1792

Fleischhauer, M., Greiving, S., Schlusemann, B., Schmidt-Thomé, P., Kallio, H., Tarvainen, T., Jarva, J., 2005. Multi-risk assessment of spatially relevant hazards in Europe, in: ESPON, ESMG Symposium, Nürnberg.

Font, M., 2002. Signature géomorphologique des déformations en domaine interplaque : application à la Normandie (Thèse de Géologie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Fonte, C., Minghini, M., Patriarca, J., Antoniou, V., See, L., Skopeliti, A., 2017. Generating Up-to-Date and Detailed Land Use and Land Cover Maps Using OpenStreetMap and GlobeLand30. ISPRS International Journal of Geo-Information 6, 125. https://doi.org/10.3390/ijgi6040125

Foody, G.M., See, L., Fritz, S., van der Velde, M., Perger, C., Schill, C., Boyd, D.S., Comber, A., 2015. Accurate Attribute Mapping from Volunteered Geographic Information: Issues of Volunteer Quantity and Quality. The Cartographic Journal 52, 336–344. https://doi.org/10.1080/00087041.2015.1108658

Foudi, S., Osés-Eraso, N., Tamayo, I., 2015. Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. Land Use Policy 42, 278–292. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.08.002

Fressard, M., 2013. Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France) (Thèse de Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Fressard, M., Maquaire, O., Thiery, Y., Davidson, R., Lissak, C., 2016. Multi-method characterisation of an active landslide: Case study in the Pays d'Auge plateau (Normandy, France). Geomorphology 270, 22–39. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.001

Fressard, M., Thiery, Y., Maquaire, O., 2014. Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale? Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France). Natural Hazards and Earth System Sciences 14, 569–588. https://doi.org/10.5194/nhess-14-569-2014

Fuchs, S., Birkmann, J., Glade, T., 2012. Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges. Natural Hazards 64, 1969–1975. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9

G

Galli, F.L., Hontarrède, M., 2001. Surcote et marée de tempête. Met. Mar 49, 79–87.

Gallien, T.W., Schubert, J.E., Sanders, B.F., 2011. Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework and data requirements. Coastal Engineering 58, 567–577. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.011

Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., Marcomini, A., 2016. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. Journal of Environmental Management 168, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011

Galton, F., 1989. Kinship and Correlation. Statistical Science 4, 81–86. https://doi.org/10.1214/ss/1177012581

Garcia-Aristizabal, A., Bucchignani, E., Palazzi, E., D'Onofrio, D., Gasparini, P., Marzocchi, W., 2015. Analysis of non-stationary climate-related extreme events considering climate change scenarios: an application for multi-hazard assessment in the Dar es Salaam region, Tanzania. Natural Hazards 75, 289–320. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1324-z

Garry, G., Graszk, E., Dupuy, J.L., 1997. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (P.P.R., guide général), La Documentation Française. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL).

Gaspar-Escribano, J.M., Iturrioz, T., 2011. Communicating earthquake risk: mapped parameters and cartographic representation. Natural Hazards and Earth System Science 11, 359–366. https://doi.org/10.5194/nhess-11-359-2011

Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A., 2009. A compilation of data on European flash floods. Journal of Hydrology 367, 70–78. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028

Geiger, A., Benner, J., Haefele, K.H., 2015. Generalization of 3D IFC Building Models, in: Breunig, M., Al-Doori, M., Butwilowski, E., Kuper, P.V., Benner, J., Haefele, K.H. (Eds.), 3D Geoinformation Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 19–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12181-9_2

Geiß, C., Taubenböck, H., 2017. One step back for a leap forward: toward operational measurements of elements at risk. Natural Hazards 86, 1–6. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2742-5

Gerkensmeier, B., Ratter, B.M.W., 2018a. Multi-risk, multi-scale and multi-stakeholder – the contribution of a bow-tie analysis for risk management in the trilateral Wadden Sea Region. Journal of Coastal Conservation 22, 145–156. https://doi.org/10.1007/s11852-016-0454-8

Gerkensmeier, B., Ratter, B.M.W., 2018b. Multi-risk, multi-scale and multi-stakeholder – the contribution of a bow-tie analysis for risk management in the trilateral Wadden Sea Region. Journal of Coastal Conservation 22, 145–156. https://doi.org/10.1007/s11852-016-0454-8

Gill, J.C., Malamud, B.D., 2017. Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. Earth-Science Reviews 166, 246–269. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.002

Gill, J.C., Malamud, B.D., 2016. Hazard interactions and interaction networks (cascades) within multi-hazard methodologies. Earth System Dynamics 7, 659–679. https://doi.org/10.5194/esd-7-659-2016

Gill, J.C., Malamud, B.D., 2014. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards: Interactions of Natural Hazards. Reviews of Geophysics 52, 680–722. https://doi.org/10.1002/2013RG000445

GIP Seine-Aval, 2018. Rapport d'activité 2018 du GIP Seine-Aval, Rapport institutionnel.

Girres, J.-F., Touya, G., 2010. Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset: Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset. Transactions in GIS 14, 435–459. https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01203.x

Glade, T., 2003. Vulnerability Assessment in Landslide Risk Analysis. Beitrag zur Erdsystemforschung 134, 123–146.

Glade, T., Crozier, M., Smith, P., 2000. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model." Pure and Applied Geophysics 157, 1059–1079.

Godfrey, A., Ciurean, R.L., van Westen, C.J., Kingma, N.C., Glade, T., 2015. Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach – An application in Nehoiu Valley, Romania. International Journal of Disaster Risk Reduction 13, 229–241. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.001

Goodchild, M., Haining, R., Wise, S., 1992. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. International journal of geographical information systems 6, 407–423. https://doi.org/10.1080/02693799208901923

Goodchild, M.F., 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. GeoJournal 69, 211–221. https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Graff, K., Lissak, C., Thiery, Y., Maquaire, O., Costa, S., Laignel, B., 2019a. Analysis and quantification of potential consequences in multirisk coastal context at different spatial scales (Normandy, France). Natural Hazards 99, 637–664. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03763-5

Graff, K., Lissak, C., Thiery, Y., Maquaire, O., Costa, S., Medjkane, M., Laignel, B., 2019b. Characterization of elements at risk in the multirisk coastal context and at different spatial scales: Multi-database integration (normandy, France). Applied Geography 111, 102076. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102076

Grandjean, G., Thomas, L., Bernardie, S., The SAMCO Team, 2018. A Novel Multi-Risk Assessment Web-Tool for Evaluating Future Impacts of Global Change in Mountainous Areas. Climate 6, 92. https://doi.org/10.3390/cli6040092

Greiving, S., 2006. Integrated risk assessment of multi-hazards: a new methodology. Geological Survey of Finland, Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions Special Paper 42, 75–82.

Grekousis, G., Manetos, P., Photis, Y.N., 2013. Modeling urban evolution using neural networks, fuzzy logic and GIS: The case of the Athens metropolitan area. Cities 30, 193–203. https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.03.006

Grekousis, G., Thomas, H., 2012. Comparison of two fuzzy algorithms in geodemographic segmentation analysis: The Fuzzy C-Means and Gustafson–Kessel methods. Applied Geography 34, 125–136. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.004

Grojean, L., 2005. Atlas des zones inondables du bassin versant de la Bresle (Rapport d'étude (non publié)). DDE 76 BCEOM, Rouen.

Guerin, M.-A., 2003. Les tempêtes, un concept et une genèse revisités : l'exemple de la façade occidentale de l'Europe. Annales de Géographie 633, 451–470.

Gulgen, F., Gokgoz, T., 2008. Selection of roads for cartographic generalization 6.

Gumus, S., Egilmez, G., Kucukvar, M., Shin Park, Y., 2016. Integrating expert weighting and multi-criteria decision making into eco-efficiency analysis: the case of US manufacturing. Journal of the Operational Research Society 67, 616–628. https://doi.org/10.1057/jors.2015.88

Guptill, S.C., Morrison, J.L., 1995. Elements of spatial data quality, Elsevier Science Ltd. ed. London.

H

Haimes, Y.Y., 2009. On the Definition of Resilience in Systems. Risk Analysis 29, 498–501. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x

Haklay, M., 2010. How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets. Environment and Planning B: Planning and Design 37, 682–703. https://doi.org/10.1068/b35097

Hanus, P., Pęska-Siwik, A., Szewczyk, R., 2018. Spatial analysis of the accuracy of the cadastral parcel boundaries. Computers and Electronics in Agriculture 144, 9–15. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.031

Hauchard, E., Laignel, B., Delahaye, D., 2002. 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 Geoscience 334, 295–302.

Haugen, E., Kaynia, A., 2008. Vulnerability of structures impacted by debris flow, in: Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F., Ho, K. (Eds.), Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future. CRC Press, pp. 381–387. https://doi.org/10.1201/9780203885284-c37

Heinimann, H., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenmacher H., H., Mani, B., 1998. Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren (Umwelmaterialien), Naturgefahren. BUWAL, Bern.

Hénaff, A., Lageat, Y., Costa, S., Plessis, E., 2002. Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution / Retreat of chalk cliffs in the Pays de Caux: processes and rates. Géomorphologie : relief, processus, environnement 8, 107–118. https://doi.org/10.3406/morfo.2002.1132

Hénaff, A., Philippe, M., 2014. Gestion des risques d'érosion et de submersion marines, Guide méthodologique.

Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. Computers & Geosciences 32, 1283–1298. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008

Henriques, J.F., Vedaldi, A., 2018. MapNet: An Allocentric Spatial Memory for Mapping Environments, in: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Presented at the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Salt Lake City, UT, pp. 8476–8484. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00884

Hildebrand, L.P., Norrena, E.J., 1992. Approaches and progress toward effective integrated coastal zone management. Marine Pollution Bulletin 25, 94–97.

Horritt, M.S., Bates, P.D., 2001. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. Hydrological Processes 15, 825–842. https://doi.org/10.1002/hyp.188

Hsieh, J.C.C., Chadwick, O.A., Kelly, E.F., Savin, S.M., 1998. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration. Geoderma 82, 269–293. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00105-5

I

İcaga, Y., Tas, E., Kilit, M., 2016. Flood inundation mapping by GIS and a hydraulic model (hec ras): a case study of Akarcay Bolvadin subbasin, in Turkey. Acta Geobalcanica 2, 111–118. https://doi.org/10.18509/AGB.2016.12

Idier, D., Dumas, F., Muller, H., 2012. Tide-surge interaction in the English Channel. Natural Hazards and Earth System Sciences 12, 3709–3718. https://doi.org/10.5194/nhess-12-3709-2012

INA, 2012. Le Havre et Dieppe inondés.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Summary for Policymakers Approved Draft), Climate change 2019.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Les éléments scientifiques. Résumé pour les décideurs., Changements climatiques.

J

Jacquart, C., Choisnel, E., 1995. Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie. La Météorologie 8, 29–44.

Jakob, M., Stein, D., Ulmi, M., 2012. Vulnerability of buildings to debris flow impact. Natural Hazards 60, 241–261. https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2

Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J.C., Mori, A., 1977. Some data on the variability in the natural environment of soil water reserve. Food and Agriculture Organization of the United Nations 324/325, 627–641.

Jia, P., Cheng, X., Xue, H., Wang, Y., 2017. Applications of geographic information systems (GIS) data and methods in obesity-related research: GIS applications in obesity-related research. Obesity Reviews 18, 400–411. https://doi.org/10.1111/obr.12495

Joannon, A., 2004. Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques: cas du ruissellement érosif dans les bassisn versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie (Thèse de Géographie). Institut national d'agronomie de Paris, Paris.

Johansson, T., Olofsson, T., Mangold, M., 2017. Development of an energy atlas for renovation of the multifamily building stock in Sweden. Applied Energy 203, 723–736. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.027

Johnson, B.A., Iizuka, K., 2016. Integrating OpenStreetMap crowdsourced data and Landsat time-series imagery for rapid land use/land cover (LULC) mapping: Case study of the Laguna de Bay area of the Philippines. Applied Geography 67, 140–149. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.12.006

Jokar Arsanjani, J., Mooney, P., Zipf, A., Schauss, A., 2015. Quality Assessment of the Contributed Land Use Information from OpenStreetMap Versus Authoritative Datasets, in: Jokar Arsanjani, J., Zipf, A., Mooney, P., Helbich, M. (Eds.), OpenStreetMap in GIScience. Springer International Publishing, Cham, pp. 37–58. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14280-7_3

Jones, C.B., Mark Ware, J., 2005. Map generalization in the Web age. International Journal of Geographical Information Science 19, 859–870. https://doi.org/10.1080/13658810500161104

Journaux, A., 1971. Formations superficielles et dynamique des versants dans le pays d'Auge, in: Réunion de La Commission d'études Des Formations Superficielles et de La Dynamique Des Versants Du Comité National de Géographie. Presented at the Colloque international de géomorphologie, Excursion dans le Pays d'Auge, p. 27.

Juigner, M., 2017. La géomatique au service de l'observation du trait de côte - Contribution à l'étude des aléas côtiers sur les littoraux dunaires de la région Pays de la Loire (France) (Thèse de Géographie). Université de Nantes, Nantes.

Juignet, P., Breton, G., 1994. Stratigraphie, rythmes sédimentaires et eustatisme dans les craies turoniennes de la région de Fécamp (Seine-Maritime, France). Expression et signification des rythmes de la craie. Bulletin trimestriel de la société géologique de Normandie et des amis du muséum du Havre 81.

K

Kang, H., Kim, Y., 2016. The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. Natural Hazards 80, 1475–1493. https://doi.org/10.1007/s11069-015-2032-z

Kang, T.W., Hong, C.H., 2015. A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration. Automation in Construction 54, 25–38. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.019

Kantamaneni, K., Phillips, M., Thomas, T., Jenkins, R., 2018. Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. Ocean & Coastal Management 158, 164–175. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.039

Kappes, Melanie S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., Glade, T., 2012a. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. Natural Hazards 64, 1925–1958. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2

Kappes, Melanie S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., Glade, T., 2012b. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. Natural Hazards 64, 1925–1958. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2

Kappes, M.S., Malet, J.-P., Remaître, A., Horton, P., Jaboyedoff, M., Bell, R., 2011. Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. Natural Hazards and Earth System Science 11, 627–641. https://doi.org/10.5194/nhess-11-627-2011

Kappes, M.S., Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., 2012. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. Applied Geography 32, 577–590. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002

Karagiorgos, K., Thaler, T., Hübl, J., Maris, F., Fuchs, S., 2016. Multi-vulnerability analysis for flash flood risk management. Natural Hazards 82, 63–87. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2296-y

Khan, D., Samadder, S.R., 2015. A simplified multi-criteria evaluation model for landfill site ranking and selection based on AHP and GIS. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 23, 267–278.

Kitchin, R., 2014. The data revolution: big data, open data, data infrastructures & their consequences. SAGE Publications, Los Angeles, California.

Knap, T., Hanečák, P., Klímek, J., Mader, C., Nečaskỳ, M., Van Nuffelen, B., Škoda, P., 2018. UnifiedViews: an ETL tool for RDF data management. Semantic Web 9, 661–676.

Knapen, A., Kitutu, M.G., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., Muwanga, A., 2006. Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): Characteristics and causal factors. Geomorphology 73, 149–165. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.004

Komar, P.D., 1998. Beach processes and sedimentation, 2nd ed. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.

Komendantova, N., Mrzyglocki, R., Mignan, A., Khazai, B., Wenzel, F., Patt, A., Fleming, K., 2014. Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: Feedback from civil protection stakeholders. International Journal of Disaster Risk Reduction 8, 50–67. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2013.12.006

Kresse, W., Fadaie, K., 2004. ISO Standards for Geographic Information. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08039-9

Kubal, C., Haase, D., Meyer, V., Scheuer, S., 2009. Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city. Natural Hazards and Earth System Science 9, 1881–1895. https://doi.org/10.5194/nhess-9-1881-2009

Kunze, C., Hecht, R., 2015. Semantic enrichment of building data with volunteered geographic information to improve mappings of dwelling units and population. Computers, Environment and Urban Systems 53, 4–18. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.04.002

L

Laaribi, A., 2000. SIG et analyse multicritère. Éd. Hermes Science Publications, Paris.

Lai, C., Chen, Xiaohong, Chen, Xiaoyu, Wang, Z., Wu, X., Zhao, S., 2015. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory. Natural Hazards 77, 1243–1259. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1645-6

Laignel, B., 1997. Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris : Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats (Thèse de Géologie). Université de Rouen, Rouen.

Laignel, B., Souissi, S., Cornier T., Ducrotoy, J.P., Bodilis J., Rochard, E., Lassalle G., 2010. Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux--Expertise collective sur l'estuaire de la Seine. GIP Seine Aval, 58 p.

Laignel, B., Costa, S., Lequien, A., Massei, N., Durand, A., Dupont, J.P., Bot, L.S., 2008. Current inputs of continental sediment to the English Channel and its beaches: A case study of the cliffs and littoral rivers of the Western Paris Basin. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues 52, 21–39. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2008/0052S3-0021

Laignel, Benoit, Costa, S., Lequien, A., Massei, N., Durand, A., Dupont, J.-P., Le Bot, S., 2008. Apports sédimentaires continentaux aux plages et à la mer de la Manche. Exemple des falaises et des rivières littorales de l'Ouest du Bassin de Paris. Zeitschrift für Geomorphology 3, 21–40.

Laignel, B., Dupuis, E., Durand, A., Dupont, J.-P., Hauchard, E., Massei, N., 2006. Erosion balance in the watersheds of the western Paris Basin by high-frequency monitoring of discharge and suspended sediment in surface water. Comptes Rendus Geoscience 338, 556–564. https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.03.010

Landemaine, V., 2016. Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle (Thèse de Sciences de la Terre). Université de Rouen Normandie, Rouen.

Larson, W.E., Lindstrom, M.J., Schumacher, T.E., 1997. The role of severe storms in soil erosion: A problem needing consideration. Journal of Soil and Water Conservation 52, 90–95.

Le Gouée, P., Delahaye, D., 2008. Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados (Rapport d'étude (non publié)).

Lee, J.-G., Kang, M., 2015. Geospatial Big Data: Challenges and Opportunities. Big Data Research 2, 74–81. https://doi.org/10.1016/j.bdr.2015.01.003

Lee, S., Pradhan, B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. Landslides 4, 33–41. https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y

Léone, F., Asté, J.-P., Leroi, E., 1996. L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains : pour une meilleure quantification du risque/ The evaluation of vulnerability to mass movements : towards a better quantification of landslide risks. Revue de géographie alpine 84, 35–46. https://doi.org/10.3406/rga.1996.3846

Lerma, A.N., Thomas, Y.-F., Durand, P., Anselme, B., Andrade, C., 2013. Modélisation de submersions marines et leur validation par observation vidéo à Carthagène des Indes, Colombie. Géomorphologie : relief, processus, environnement 19, 481–498. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10417

Leroi, E., 1996. Landslides hazard – risk maps at different scales: objectives, tools and developments. Presented at the Proceedings of the 7th Int. Symp. on Landslides, Norway, pp. 35–51.

Letortu, P., 2013. Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits (Thèse de Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Letortu, P., Costa, S., Bensaid, A., Cador, J.-M., Quénol, H., 2014. Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France) : méthodologie et variabilité du recul. Géomorphologie : relief, processus, environnement 20, 133–144. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10588

Letortu, P., Costa, S., Cador, J.-M., Coinaud, C., Cantat, O., 2015. Statistical and empirical analyses of the triggers of coastal chalk cliff failure: Triggers of Coastal Chalk Cliff Failure. Earth Surface Processes and Landforms 40, 1371–1386. https://doi.org/10.1002/esp.3741

Letortu, P., Costa, S., Cantat, O., 2012. Les submersions marines en manche orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer. Climatologie. https://doi.org/10.4267/climatologie.165

Letortu, P., Costa, S., Cantat, O., Planchon, O., 2016. Conditions météo-marines responsables des inondations par la mer en Manche orientale française. La Houille Blanche 41–46. https://doi.org/10.1051/lhb/2016017

Letortu, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., 2019. Marine and subaerial controls of coastal chalk cliff erosion in Normandy (France) based on a 7-year laser scanner monitoring. Geomorphology 335, 76–91. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.005

Letouzé, A., 1993. Les carrières de Caen: Risques et contraintes sur l'environnement urbain (Thèse de Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Li, C., Cheng, X., Li, N., Du, X., Yu, Q., Kan, G., 2016. A Framework for Flood Risk Analysis and Benefit Assessment of Flood Control Measures in Urban Areas. International Journal of Environmental Research and Public Health 13, 787. https://doi.org/10.3390/ijerph13080787

Li, J., Wong, D.W.S., 2010. Effects of DEM sources on hydrologic applications. Computers, Environment and Urban Systems 34, 251–261. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.11.002

Li, M.-H., Chibber, P., 2008. Overland Flow Time of Concentration on Very Flat Terrains. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2060, 133–140. https://doi.org/10.3141/2060-15

Li, X., Yeh, A.G.-O., 2002. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. International Journal of Geographical Information Science 16, 323–343. https://doi.org/10.1080/13658810210137004

Lissak, C., 2012. Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados) : Morphologie, fonctionnement et gestion du risque. (Thèse de Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Lissak, C., Maquaire, O., Malet, J.-P., Bitri, A., Samyn, K., Grandjean, G., Bourdeau, C., Reiffsteck, P., Davidson, R., 2014. Airborne and ground-based data sources for characterizing the morpho-structure of a coastal landslide. Geomorphology 217, 140–151. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.019

Lissak, C., Maquaire, O., Puissant, A., Malet, J.-P., 2013. Landslide Consequences and Post Crisis Management Along the Coastal Slopes of Normandy, France, in: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), Landslide Science and Practice. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 23–30. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31313-4_4

Liu, B., Siu, Y.L., Mitchell, G., 2016. Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment. Natural Hazards and Earth System Sciences 16, 629–642. https://doi.org/10.5194/nhess-16-629-2016

Logan, J.R., Stults, B.J., Xu, Z., 2016. Validating Population Estimates for Harmonized Census Tract Data, 2000–2010. Annals of the American Association of Geographers 106, 1013–1029. https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1187060

Longo, M.R., Haggard, P., 2012. Implicit body representations and the conscious body image. Acta Psychologica 141, 164–168. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.07.015

López Tarazón, J.A., 2011. In-channel sediment storage in a highly erodible catchment: the River Isabena (Ebro Basin, Southern Pyrenees). Zeitschrift für Geomorphologie 55, 365–382.

Lozoya, J.P., Sardá, R., Jiménez, J.A., 2011. A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches. Environmental Science & Policy 14, 685–696. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.002

M

Maanan, M., Robin, M. (Eds.), 2015. Sediment fluxes in coastal areas, Coastal research library. Springer, Dordrecht Heidelberg New York.

Malet, J.-P., Maquaire, O., Locat, J., Rema﹟tre, A., 2004. Assessing debris flow hazards associated with slow moving landslides: methodology and numerical analyses. Landslides 1, 83–90. https://doi.org/10.1007/s10346-003-0005-x

Malet, J.-P., Thiery, Y., Maquaire, O., Puissant, A., 2006. Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque glissement de terrain. Revue internationale de géomatique 16, 499–525. https://doi.org/10.3166/rig.16.499-525

Maquaire, O., 2002. Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie. (Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches). Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Maquaire, O., 2000. Effects of groundwater on the Villerville-Cricqueboeuf landslide. Sixteen years of survey Calvados, in: Proc. 8th Int. Symp. On Landslides,. Cardiff, Telford, pp. 1005–1010.

Maquaire, O., 1990. Les mouvements de terrain de la côte du Calvados, Recherches et prévention. Documents du BRGM, Orléans.

Maquaire, O., Thiery, Y., Malet, J.-P., Puissant, A., 2006. Evaluation et cartographie par SIG du risque "'glissements de terrain'". Application aux Alpes du Sud. Interactions Nature-Société - Analyse et Modèles 6.

Martani, C., Cattarinussi, L., Adey, B.T., 2018. A new process for the evaluation of the net-benefit of flexible ground-floor ceiling in the face of use transition uncertainty. Journal of Building Engineering 15, 156–170. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.019

Martínez-Graña, A.M., Goy, J.L., Zazo, C., 2015. Cartographic Procedure for the Analysis of Aeolian Erosion Hazard in Natural Parks (Central System, Spain). Land Degradation & Development 26, 110–117. https://doi.org/10.1002/ldr.2189

Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M.L., Di Ruocco, A., 2012. Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. Natural Hazards 62, 551–573. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x

Marzocchi, W, Mastellone, M., Di Ruocco, A., Novelli, P., Romeo, E., Gasparini, P., 2009. Principles of multi-risk assessment: interactions amongst natural and man-induced risks. European Commission.

Marzocchi, Warner, Mastellone, M.L., Di Ruocco, A., 2009. Principles of multi-risk assessment: interactions amongst natural and man-induced risks, Tech. rep. European Commission.

Mason, D., Hill, D., Davenport, I., Flather, R., Robinson, G., 1997. Improving inter-tidal digital elevation models constructed by the waterline technique. ESA earthnet online.

MATE/METL, 2016. Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR), La Documentation Française. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL), Paris.

MATE/METL, 1999a. Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR): Risques d'Inondation, La Documentation Française. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL), Paris.

MATE/METL, 1999b. Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR): Risques de Mouvements de Terrain, La Documentation Française. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL), Paris.

Mateo Lázaro, J., Sánchez Navarro, J.Á., García Gil, A., Edo Romero, V., 2016. Flood Frequency Analysis (FFA) in Spanish catchments. Journal of Hydrology 538, 598–608. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.058

Mauro, D., Bouchon, S., Frattini, P., Lari, S., Buldrini, M., Oliveri, S., 2012. A Regional Multi-Risk Assessment Approach to Support the Definition Public Mitigation Strategies 5.

Mavrouli, O., Corominas, J., 2010. Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. Natural Hazards and Earth System Science 10, 2055–2066. https://doi.org/10.5194/nhess-10-2055-2010

Mégnien, C., Mégnien, F., 1980. Synthèse géologique du Bassin de Paris. Mémoire du Bureau des Recherches Géologiques et Minières 3.

Mensah, F.J., O'Brien, W.J., Khwaja, N., Bussell, L.C., 2017. GIS-based visualization of integrated highway maintenance and construction planning: a case study of Fort Worth, Texas. Visualization in Engineering 5. https://doi.org/10.1186/s40327-017-0046-1

Météo France, 2018. Tempêtes en France métropolitaine [WWW Document]. URL http://tempetes.meteo.fr/

Meyer, V., Haase, D., Scheuer, S., 2009a. Flood Risk Assessment in European River Basins—Concept, Methods, and Challenges Exemplified at the Mulde River. Integrated Environmental Assessment and Management 5, 17. https://doi.org/10.1897/IEAM_2008-031.1

Meyer, V., Scheuer, S., Haase, D., 2009b. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. Natural Hazards 48, 17–39. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9244-4

Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., Maquaire, O., Letortu, P., Davidson, R., 2015. Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. Landslides 12, 403–418. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0542-5

Mignan, A., Wiemer, S., Giardini, D., 2014. The quantification of low-probability–high-consequences events: part I. A generic multi-risk approach. Natural Hazards 73, 1999–2022. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1178-4

Milanesi, L., Pilotti, M., Belleri, A., Marini, A., Fuchs, S., 2018. Vulnerability to Flash Floods: A Simplified Structural Model for Masonry Buildings. Water Resources Research 54, 7177–7197. https://doi.org/10.1029/2018WR022577

Miller, H.J., Goodchild, M.F., 2015. Data-driven geography. GeoJournal 80, 449–461. https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6

Mistry, A., Lodha, P., Prakash, I., Mehmood, K., 2017. ESTIMATION OF DIRECT RUNOFF FOR PURNA RIVER SUB-BASIN, USING SCS-CN METHOD, DANGS DISTRICT, GUJARAT. International Journal of Advance Engineering and Research Development 4. https://doi.org/10.21090/IJAERD.53055

Montz, B.E., Tobin, G.A., Hagelman, R.R., Tobin, G.A., 2017. Natural hazards: explanation and integration, Second Edition. ed. The Guilford Press, New York.

Mouroux, P., Brun, B.L., 2006. Presentation of RISK-UE Project. Bulletin of Earthquake Engineering 4, 323–339. https://doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3

Mousazadeh, R., Ghaffarzadeh, H., Nouri, J., Gharagozlou, A., Farahpour, M., 2017. A Quantitative Analysis of Socioeconomic Impacts of Sea Level Rise on the Anzali International Coastal Wetland. Polish Journal of Environmental Studies 26, 1173–1181. https://doi.org/10.15244/pjoes/64081

Muis, S., Güneralp, B., Jongman, B., Aerts, J.C.J.H., Ward, P.J., 2015. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data. Science of The Total Environment 538, 445–457. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.068

N

Nesteroff, W.D., Lancelot, Y., Mélières, F., 1967. Reconnaissance du haut fond de Rochebonne. Vie et Milieu, sér. B: Océanogr 18, 103–111.

Nezarat, H., Sereshki, F., Ataei, M., 2015. Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). Tunnelling and Underground Space Technology 50, 358–364. https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.07.019

Nicolls, R.J., Marinova, N., Lowe, J.A., Brown, S., Vellinga, P., de Gusmão, D., Hinkel, J., Tol, R.S.J., 2011. Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 369, 161–181. https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0291

Nyberg, B., Nixon, C.W., Sanderson, D.J., 2018. NetworkGT: A GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. Geosphere 14, 1618–1634. https://doi.org/10.1130/GES01595.1

O

Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., Díaz, M., 2016. Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. 3, 8.

Olfert, A., Greiving, S., Batista, M.J., 2006. Regional Multi-risk Review, Hazard Weighting and Spatial Planning Response to Risk-Results from European Case Studies. Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions, Geological Survey of Finland, Special Paper 42, 125–151.

Olteanu-Raimond, A.-M., Hart, G., Foody, G.M., Touya, G., Kellenberger, T., Demetriou, D., 2017. The Scale of VGI in Map Production: A Perspective on European National Mapping Agencies: VGI and the National Mapping Agencies. Transactions in GIS 21, 74–90. https://doi.org/10.1111/tgis.12189

Orford, J.D., Forbes, D.L., Jennings, S.C., 2002. Organisational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems. Geomorphology 48, 51–85. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00175-7

ONERC, 2015. Sols : quel est le lien entre sécheresse et canicule ? Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. 4 p.

Ortiz, P., Antunez, V., Martín, J.M., Ortiz, R., Vázquez, M.A., Galán, E., 2014. Approach to environmental risk analysis for the main monuments in a historical city. Journal of Cultural Heritage 15, 432–440. https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.07.009

Ostad-Ali-Askari, K., Shayannejad, M., 2015. Optimal design of pressurized irrigation laterals installed on sloping land 7.

Ouma, Y., Tateishi, R., 2014. Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. Water 6, 1515–1545. https://doi.org/10.3390/w6061515

P

Pandey, G.R., Nguyen, V.-T.-V., 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. Journal of Hydrology 225, 92–101. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00135-3

Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., Kossieris, P., 2018. An Operational Method for Flood Directive Implementation in Ungauged Urban Areas. Hydrology 5, 24. https://doi.org/10.3390/hydrology5020024

Papathoma-Köhle, M., Gems, B., Sturm, M., Fuchs, S., 2017a. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. Earth-Science Reviews 171, 272–288. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.007

Papathoma-Köhle, M., Gems, B., Sturm, M., Fuchs, S., 2017b. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. Earth-Science Reviews 171, 272–288. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.007

Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., Dominey-Howes, D., 2007. Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. Nat. Hazards Earth Syst Sci., 765–779.

Paskoff, R., 1998. La crise des plages : pénurie de sédiments. Mappe monde 52, 11–15.

Paskoff, R., 1985. Les côtes d'Albanie. Aspects géomorphologiques.(The coastline of Albania. Geomorphic features). Bulletin de l'Association de Géographes Français 62, 77–83.

Payraudeau, S., 2002. Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants Méditerranéens (Thèse de Sciences de l'eau). Université Montpellier II, Montpellier.

Penadés-Plà, V., García-Segura, T., Martí, J., Yepes, V., 2016. A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design. Sustainability 8, 1295. https://doi.org/10.3390/su8121295

Peng, B., Lin, C., Jin, D., Rao, H., Jiang, Y., Liu, Y., 2013. Modeling the total allowable area for coastal reclamation: A case study of Xiamen, China. Ocean & Coastal Management 76, 38–44. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.02.015

Perherin, C., Azzam, C., Kergadallan, X., 2012. Révision du guide méthodologique plans de prévention des risques littoraux : une meilleure prise en compte de l'ensemble des phénomènes pour la connaissance de l'aléa submersion marine 9.

Pescaroli, G., Alexander, D., 2015. A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the "toppling dominos" metaphor. GRF Davos Planet@Risk, Special Issue on the 5th IDRC Davos 2014 3, 58–67.

Petley, D.N., Bulmer, M.H., Murphy, W., 2002. Patterns of movement in rotational and translational landslides. Geology 30, 719. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0719:POMIRA>2.0.CO;2

Petrucci, O., Gullà, G., 2010. A simplified method for assessing landslide damage indices. Natural Hazards 52, 539–560. https://doi.org/10.1007/s11069-009-9398-8

Petrucci, O., Pasqua, A.A., Gullà, G., 2010. Landslide damage assessment using the Support Analysis Framework (SAF): the 2009 landsliding event in Calabria (Italy). Advances in Geosciences 26, 13–17. https://doi.org/10.5194/adgeo-26-13-2010

Pierson, T.C., Costa, J.E., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation. Reviews in Engineering Geology 7, 1–12.

Pigeon, P., 2002. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. Annales de Géographie 111, 452–470. https://doi.org/10.3406/geo.2002.21624

Piwakowski, B., Driad-Lebeau, L., Kosecki, A., Safinowski, P., 2006. Détection des marnières de Haute Normandie par sismique haute résolution 5.

Planchon, O., Quénol, H., Irimia, L., Patriche, C., 2015. European cold wave during February 2012 and impacts in wine growing regions of Moldavia (Romania). Theoretical and Applied Climatology 120, 469–478. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1191-2

Planton, S., Cozannet, G.L., Cazenave, A., Costa, S., Douez, O., Gaufrès, P., Hissel, F., Idier, D., Laborie, V., Petit, V., Sergent, P., 2015. Le climat de la France au XXIe siècle. Vol 5: Changement climatique et niveau de la mer: de la planète aux côtes françaises 72.

Ponniah, P., 2001. Data Warehousing Fundamentals. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. https://doi.org/10.1002/0471221627

Pontee, N.I., Pye, K., Blott, S.J., 2004. Morphodynamic behaviour and sedimentary variation of mixed sand and gravel beaches. Journal of Coastal Research 256–276.

Potter, S., Doran, B., Mathews, D., 2016. Modelling collective Yawuru values along the foreshore of Roebuck Bay, Western Australia using fuzzy logic. Applied Geography 77, 8–19. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.016

Pradhan, B., 2010. Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 38, 301–320. https://doi.org/10.1007/s12524-010-0020-z

Preacher, K.J., Curran, P.J., Bauer, D.J., 2006. Computational Tools for Probing Interactions in Multiple Linear Regression, Multilevel Modeling, and Latent Curve Analysis. Journal of Educational and Behavioral Statistics 31, 437–448. https://doi.org/10.3102/10769986031004437

Prêcheur, C., 1960. Le littoral de la Manche, de Sainte-Adresse à Ault : étude morphologique. hors-série, Norois 1, 1–38.

Promper, C., Gassner, Ch., Glade, T., 2015. Spatiotemporal patterns of landslide exposure – a step within future landslide risk analysis on a regional scale applied in Waidhofen/Ybbs Austria. International Journal of Disaster Risk Reduction 12, 25–33. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.11.003

Puissant, A., Sheeren, D., Weber, C., Wemmert, C., Gançarski, P., 2006. Amélioration des connaissances sur l'environnement urbain: intérêt de l'intégration de règles dans les procédures de classification. Interactions Nature-Société, analyse et modèles 3–6.

Puissant, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J.-P., Maquaire, O., 2013. Landslide consequence analysis: a region-scale indicator-based methodology. Landslides 11, 843–858. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0429-x

Pumain, D., Saint-Julien, T., 2010. Analyse spatiale : Les localisations.

Q

Quan Luna, B., Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S., van Asch, T.W.J., Akbas, S.O., 2011. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. Natural Hazards and Earth System Science 11, 2047–2060. https://doi.org/10.5194/nhess-11-2047-2011

Quesnel, F., 1997. Cartographie numérique en géologie de surface : application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris (Thèse de Géologie). Université de Rouen, Rouen.

Quirogaa, V.M., Kurea, S., Udoa, K., Manoa, A., 2016. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. Ribagua 3, 25–33. https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001

R

Rafiee, A., Dias, E., Fruijtier, S., Scholten, H., 2014. From BIM to Geo-analysis: View Coverage and Shadow Analysis by BIM/GIS Integration. Procedia Environmental Sciences 22, 397–402. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.11.037

Raji, O., Dezileau, L., Von Grafenstein, U., Niazi, S., Snoussi, M., Martinez, P., 2015. Extreme sea events during the last millennium in the northeast of Morocco. Natural Hazards and Earth System Sciences 15, 203–211. https://doi.org/10.5194/nhess-15-203-2015

Rau, H., Goggins, G., Fahy, F., 2017. From invisibility to impact: Recognising the scientific and societal relevance of interdisciplinary sustainability research. Research Policy 47, 266–276. https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.11.005

Rebour, T., 2005. Openfield et bocage : étude du contact entre le Vexin normand et le Pays de Bray. Cahiers de géographie du Québec 44, 27–42. https://doi.org/10.7202/022880ar

Reghezza-Zitt, M., 2006. Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale (Thèse de Géographie). Université Paris Nanterre, Paris.

Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., 2016. Resilience Imperative: uncertainty, risks and disasters.

Réseau d'observation du littoral (ROL), 2019. Les données clés de la mer et du littoral - synthèse des fiches thématiques de l'observatoire [WWW Document]. ROL Normandie - Hauts-de-France. URL https://maps.rolnp.fr/

Reulier, R., Delahaye, D., Viel, V., Davidson, R., 2017. Connectivité hydro-sédimentaire dans un petit bassin versant agricole du nord-ouest de la France : de l'expertise de terrain à la modélisation par Système Multi-Agent. Géomorphologie : relief, processus, environnement 23, 327–340. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11857

Robert Brakenridge, G., Cohen, S., Kettner, A.J., De Groeve, T., Nghiem, S.V., Syvitski, J.P.M., Fekete, B.M., 2012. Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model. Journal of Hydrology 475, 123–136. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.035

Roche, M., 1963. Hydrologie de surface, Office de la recherche scientifique et technique outre-mer. ed. Paris.

Rodet, J., 1983. Karst et littoral du Bec de Caux (Seine-Maritime, Normandi, France). Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique 2, 23–32. https://doi.org/10.3406/karst.1983.2050

Rodriguez-Acosta, C.A., Rosenbaum, A., 2005. Local government and the governance of metropolitan areas in Latin America. Public Administration and Development 25, 295–306. https://doi.org/10.1002/pad.387

Rosendahl Appelquist, L., Balstrøm, T., 2014. Application of the Coastal Hazard Wheel methodology for coastal multi-hazard assessment and management in the state of Djibouti. Climate Risk Management 3, 79–95. https://doi.org/10.1016/j.crm.2014.06.002

Rosendahl Appelquist, L., Halsnæs, K., 2015. The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. Journal of Coastal Conservation 19, 157–179. https://doi.org/10.1007/s11852-015-0379-7

Rosendhal Appelquist, L.R., 2012. The Coastal Hazard Wheel. UNEP RISO CENTRE.

Roulland, T., Maquaire, O., Costa, S., Compain, V., Davidson, R., Medjkane, M., 2019. Dynamique des falaises des Vaches Noires : analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France). Géomorphologie : relief, processus, environnement 25, 37–55. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12989

S

Saaty, T.L., 2006. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. European Journal of Operational Research 168, 557–570. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.032

Saaty, T.L., Vargas, L.G., 2001. The Decision by the US Congress on China's Trade Status: A Multicriteria Analysis, in: Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Springer US, Boston, MA, pp. 305–317. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1665-1_22

Sabatier, F., Anthony, E.J., Héquette, A., Suanez, S., Musereau, J., Ruz, M.-H., Regnauld, H., 2009. Morphodynamics of beach/dune systems: examples from the coast of France. Géomorphologie : relief, processus, environnement 15, 3–22. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7461

Sahoo, B., Bhaskaran, P.K., 2018. A comprehensive data set for tropical cyclone storm surge-induced inundation for the east coast of India: data set for storm surge and inundation for east coast of india. International Journal of Climatology 38, 403–419. https://doi.org/10.1002/joc.5184

Saint-Martin, C., Javelle, P., Vinet, F., 2018. DamaGIS: a multisource geodatabase for collection of flood-related damage data 11.

Salimi, E.T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., Holisaz, A., 2017. Estimating time of concentration in large watersheds. Paddy and Water Environment 15, 123–132. https://doi.org/10.1007/s10333-016-0534-2

Sampson, C.C., Smith, A.M., Bates, P.D., Neal, J.C., Alfieri, L., Freer, J.E., 2015. A high-resolution global flood hazard model: A HIGH-RESOLUTION GLOBAL FLOOD HAZARD MODEL. Water Resources Research 51, 7358–7381. https://doi.org/10.1002/2015WR016954

Sanchez, R., Torres, J.P., Zhu, M.N., Ahmed, Z., 2018. A two-stage GIS-based methodology to support optimal Green Infrastructure allocation for large cities, in: Abstract. Presented at the AGU Fall Meeting.

Satta, A., Puddu, M., Venturini, S., Giupponi, C., 2017. Assessment of coastal risks to climate change related impacts at the regional scale: The case of the Mediterranean region. International Journal of Disaster Risk Reduction 24, 284–296. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.06.018

Scheuer, S., Haase, D., Meyer, V., 2013. Towards a flood risk assessment ontology – Knowledge integration into a multi-criteria risk assessment approach. Computers, Environment and Urban Systems 37, 82–94. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.07.007

Scheuer, S., Haase, D., Meyer, V., 2011. Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: from a starting point view towards an end point view of vulnerability. Natural Hazards 58, 731–751. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9666-7

Schmidt, J., Matcham, I., Reese, S., King, A., Bell, R., Henderson, R., Smart, G., Cousins, J., Smith, W., Heron, D., 2011. Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling. Natural Hazards 58, 1169–1192. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9721-z

Schmidt-Thomé, P. (Ed.), 2006. Sea level change affecting the spatial development of the Baltic Sea Region: a collection of peer reviewed articles on the results of the INTERREG IIIB Baltic Sea Region (BSR) project "Sea level change affecting the spatial development of the Baltic Sea Region - SEAREG," Special paper / Geological Survey of Finland. Geological Survey of Finland, Espoo.

Schubert, J.E., Sanders, B.F., 2012. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. Advances in Water Resources 41, 49–64. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012

Servigne, S., Ubeda, T., Puricelli, A., Laurini, R., 2000. A Methodology for Spatial Consistency Improvement of Geographic Databases 28.

Shah, T.I., Milosavljevic, S., Bath, B., 2017. Measuring geographical accessibility to rural and remote health care services: Challenges and considerations. Spatial and Spatio-temporal Epidemiology 21, 87–96. https://doi.org/10.1016/j.sste.2017.04.002

Shen, Y., Jia, H., Li, C., Tang, J., 2018. Numerical simulation of saltwater intrusion and storm surge effects of reclamation in Pearl River Estuary, China. Applied Ocean Research 79, 101–112. https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.013

Shi, P., Zhang, Y., Li, Z., Li, P., Xu, G., 2017. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. CATENA 151, 182–190. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.017

SHOM, 2017. Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. SHOM.

SHOM, 2013. Annale Hydrographique (No. 778).

Siembieda, W., 2010. Lowering vulnerability using the asset-access-time method. Journal of Disaster Research 5, 180–186.

Silva, J.C.F., Carvalho, T.F.M., Basso, M.F., Deguchi, M., Pereira, W.A., Sobrinho, R.R., Vidigal, P.M.P., Brustolini, O.J.B., Silva, F.F., Dal-Bianco, M., Fontes, R.L.F., Santos, A.A., Zerbini, F.M., Cerqueira, F.R., Fontes, E.P.B., 2017. Geminivirus data warehouse: a database enriched with machine learning approaches. BMC Bioinformatics 18. https://doi.org/10.1186/s12859-017-1646-4

Sinha, R., Bapalu, G.V., Singh, L.K., Rath, B., 2008. Flood risk analysis in the Kosi river basin, north Bihar using multi-parametric approach of analytical hierarchy process (AHP). Journal of the Indian Society of Remote Sensing 36, 335–349.

Sivapalan, M., Blöschl, G., Merz, R., Gutknecht, D., 2005. Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality: FLOOD FREQUENCY AND HYDROLOGIC SEASONALITY. Water Resources Research 41. https://doi.org/10.1029/2004WR003439

Sloto, R.A., Crouse, Y., 1996. HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis. Water-Resources Investigations Report 96, 51. https://doi.org/10.3133/wri964040

Souchère, V., King, C., Dubreuil, N., Lecomte-Morel, V., Le Bissonnais, Y., Chalat, M., 2003. Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. Environmental Science & Policy 6, 7–16. https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00121-1

Stehman, S.V., Fonte, C.C., Foody, G.M., See, L., 2018. Using volunteered geographic information (VGI) in design-based statistical inference for area estimation and accuracy assessment of land cover. Remote Sensing of Environment 212, 47–59. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.014

Strahler, A.N., 4 - 76. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks, Handbook of Applied Hydrology. ed, Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. McGraw-Hill, New York.

Sui, D., 2008. he wikification of GIS and its consequences: Or Angelina Jolie's new tattoo and the future of GIS. Computers, Environment and Urban Systems 32, 1–5.

Svensson, C., Jones, D.A., 2004a. Dependence between sea surge, river flow and precipitation in south and west Britain. Hydrology and Earth System Sciences 8, 973–992. https://doi.org/10.5194/hess-8-973-2004

Svensson, C., Jones, D.A., 2004b. Joint probability: Dependence between sea surge, river flow and precipitation in south and west Britain. Hydrology and Earth System Sciences 8, 973–992. https://doi.org/10.5194/hess-8-973-2004

T

Tapscott, D., Williams, A.D., 2007. Wikinomics : Wikipédia, Linux, You Tube : comment l'intelligence collaborative bouleverse l'économie, in: Pearson/Village Mondial. Paris.

Tapsell, S., McCarthy, S., Faulkner, H., Alexander, M., 2010. Social vulnerability to natural hazards. Flood Hazard Research Centre, London.

Tayyebi, A., Pijanowski, B.C., Tayyebi, A.H., 2011. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: An application to Tehran, Iran. Landscape and Urban Planning 100, 35–44. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.007

Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N., 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. Journal of Hydrology 504, 69–79. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034

Thierry, P., Stieltjes, L., Kouokam, E., Nguéya, P., Salley, P.M., 2008. Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at Mount Cameroon. Natural Hazards 45, 429–456. https://doi.org/10.1007/s11069-007-9177-3

Thiery, Y., 2007. Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux "mouvements de versant": cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. Geomorphology 92, 38–59. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.020

Thouret, J.-C., Ettinger, S., Guitton, M., Santoni, O., Magill, C., Martelli, K., Zuccaro, G., Revilla, V., Charca, J.A., Arguedas, A., 2014. Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). Natural Hazards 73, 1771–1815. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1172-x

Thywissen, K., 2006. Components of risk: a comparative glossary, Studies of the university: research, counsel, education. United Nations University Institute for Environment and Human Security, Bonn.

Timmerman, P., 1981. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of models and possible climatic applications (Institute for Environmental Studies). University of Toronto, Toronto.

Totschnig, R., Sedlacek, W., Fuchs, S., 2011. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. Natural Hazards 58, 681–703. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9623-5

Trzpit, J.P., 1970. Atlas de Normandie. Article de présentation du climat normand, Association de l'Atlas de Normandie.

Tsuzuki, M. de S.G., Shimada, M., 2003. Geometric classification tests using interval arithmetic in b-rep solid modeling. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 25, 396–402. https://doi.org/10.1590/S1678-58782003000400012

Turki, I., Laignel, B., Chevalier, L., Costa, S., Massei, N., 2015. On the Investigation of the Sea-Level Variability in Coastal Zones Using SWOT Satellite Mission: Example of the Eastern English Channel (Western France). IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 8, 1564–1569. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2419693

U

UNDP/BCPR (Ed.), 2004. Reducing disaster risk: a challenge for development ; a global report. New York.

UNDRO, 1979. Natural disasters and vulnerability analysis, Report of Expert Group Meeting. Geneva.

UNISDR, 2009. Making Disaster Risk Reduction Gender Sensitive:Policy and Practical Guidelines, Natural Environment Gender. United Nations.

UN/ISDR, 2004. Living with risk, United Nation International Strategy for Disaster Reduction. New York.

USACE, 2016. Apalachicola-Chattahoochee-Flint (ACF). Remand Modeling Technical Report.

Uzielli, M., Catani, F., Tofani, V., Casagli, N., 2015. Risk analysis for the Ancona landslide—II: estimation of risk to buildings. Landslides 12, 83–100. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0477-x

V

Valenzuela, C., Baumgardner, M.F., 1990. Selection of appropriate cell sizes for thematic maps. ITC Journal 3, 219–224.

Van der Fels-Klerx, H.J., Van Asselt, E.D., Raley, M., Poulsen, M., Korsgaard, H., Bredsdorff, L., Nauta, M., D'agostino, M., Coles, D., Marvin, H.J.P., Frewer, L.J., 2018. Critical review of methods for risk ranking of food-related hazards, based on risks for human health. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 58, 178–193. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1141165

Van Der Knijff, J.M., Younis, J., De Roo, A.P.J., 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. International Journal of Geographical Information Science 24, 189–212. https://doi.org/10.1080/13658810802549154

Van Vliet-Lanoë, B., 1987. Dynamique périglaciaire actuelle et passée : apport de l'étude micromorphologique et de l'expérimentation. Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire 24, 113–132. https://doi.org/10.3406/quate.1987.1839

van Westen, C., Kappes, M.S., Luna, B.Q., Frigerio, S., Glade, T., Malet, J.-P., 2014. Medium-Scale Multi-hazard Risk Assessment of Gravitational Processes, in: Van Asch, T., Corominas, J., Greiving, S., Malet, J.-P., Sterlacchini, S. (Eds.), Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 201–231. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6769-0_7

Van Westen, C.J., 2004. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. Landslides: evaluation and stabilization 1, 39–56.

Van Westen, C.J., 2000. The modelling of landslide hazards using GIS. Surveys in Geophysics 21, 241–255.

van Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. Engineering Geology 102, 112–131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010

van Westen, C.J., Luna, B.Q., Franco, R.V., Malet, J.P., Jaboyedoff, M., Horton, P., Kappes, M., 2011. Development of training materials on the use of Geo-information for Multi-Hazard Risk Assessment in a Mountainous Environment, in: Proceedings of the Mountain Risks International Conference. Firenze, Italy, pp. 24–26.

van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? Bulletin of Engineering Geology and the Environment 65, 167–184. https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0

Vargas, J., Rivera, L., Salazar, A., Robledo, V., Chang, P., Temgoua, A.G.T., 2019. Comparative study of the hec-ras, iber and flow 3d softwares in studying flow caracteristics across a dynamic meander in colombia, in: Growing with Youth. Presented at the CSCE Annual Conference, Laval.

Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, Natural hazards. Unesco, Paris.

Vassiliadis, P., Simitsis, A., Skiadopoulos, S., 2002. Modeling ETL activities as graphs., in: DMDW. pp. 52–61.

Vauglin, F., 1997. Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires (Thèse de Sciences de l'information géographique). Université Paris-Est Marne-la-Vallée.

Veldhuis, J.A.E., 2011. How the choice of flood damage metrics influences urban flood risk assessment: Urban flood risk assessment. Journal of Flood Risk Management 4, 281–287. https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01112.x

Viel, V., 2012. Analyse spatiale et temporelle des transferts sédimentaires dans les hydrosystèmes normands. Exemple du bassin versant de la Seulles (Thèse de Géographie). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Vink, A.P.A., 1975. Cartographie de sols et de paysages en Suisse occidentale. Geographica Helvetica 30, 169–178. https://doi.org/10.5194/gh-30-169-1975

Vojinovic, Z., Hammond, M., Golub, D., Hirunsalee, S., Weesakul, S., Meesuk, V., Medina, N., Sanchez, A., Kumara, S., Abbott, M., 2016. Holistic approach to flood risk assessment in areas with cultural heritage: a practical application in Ayutthaya, Thailand. Natural Hazards 81, 589–616. https://doi.org/10.1007/s11069-015-2098-7

W

Ward, R.C., 1975. Principles of Hydrology, McGraw-Hill. ed. New York.

Wassmann, R., Hien, N.X., Hoanh, C.T., Tuong, T.P., 2004. Sea Level Rise Affecting the Vietnamese Mekong Delta: Water Elevation in the Flood Season and Implications for Rice Production. Climatic Change 66, 89–107. https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043144.69736.b7

Webb, A., Waseda, T., Fujimoto, W., Horiuchi, K., Kiyomatsu, K., Matsuda, K., Miyazawa, Y., Varlamov, S., Yoshikawa, J., 2016. A High-Resolution, Wave and Current Resource Assessment of Japan: The Web GIS Dataset. arXiv:1607.02251 [physics].

Wei, S.-H., Chen, S.-M., 2009. Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers. Expert Systems with Applications 36, 2285–2299. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.12.037

Weibel, R., Dutton, G., 1999. Generalising spatial data and dealing with multiple representations 32.

Winsemius, H.C., Van Beek, L.P.H., Jongman, B., Ward, P.J., Bouwman, A., 2013. A framework for global river flood risk assessments. Hydrology and Earth System Sciences 17, 1871–1892. https://doi.org/10.5194/hess-17-1871-2013

Wisler, C.O., Brater, E.F., 1959. Hydrology, John Wiley & Son. ed. New York.

Woldesenbet, T.A., Elagib, N.A., Ribbe, L., Heinrich, J., 2017a. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Science of The Total Environment 575, 724–741. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.124

Woldesenbet, T.A., Elagib, N.A., Ribbe, L., Heinrich, J., 2017b. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Science of The Total Environment 575, 724–741. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.124

Wu, S., Yarnal, B., Fisher, A., 2002. Vulnerability of coastal communities to sea-level rise: a case study of Cape May County, New Jersey, USA. Climate Research 22, 255–270. https://doi.org/10.3354/cr022255

X

Xie, Z., Li, X., Jiang, D., Lin, S., Yang, B., Chen, S., 2019. Threshold of island anthropogenic disturbance based on ecological vulnerability Assessment——A case study of Zhujiajian Island. Ocean & Coastal Management 167, 127–136. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.10.014

Y

Yin, J., Soliman, A., Yin, D., Wang, S., 2017. Depicting urban boundaries from a mobility network of spatial interactions: a case study of Great Britain with geo-located Twitter data. International Journal of Geographical Information Science 31, 1293–1313. https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1282615

Yılmaz, A., Canıberk, M., 2018. Real time vector database updating system: a case study for turkish topographic vector database (TOPOVT). International Journal of Engineering and Geosciences. https://doi.org/10.26833/ijeg.383054

Yu, P.-S., Chen, S.-T., Chang, I.-F., 2006. Support vector regression for real-time flood stage forecasting. Journal of Hydrology 328, 704–716. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.01.021

Z

Zahran, E.-S.M.M., Tan, S.J., Yap, Y.H., Tan, E.H., Pena, C.M.F., Yee, H.F., Uddin, M.R., 2019. An Investigation into the Impact of Alternate Road Lighting on Road Traffic Accident Hotspots Using Spatial Analysis, in: 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), IEEE, Singapore, pp. 242–246. https://doi.org/10.1109/ICITE.2019.8880263

Zahran, S., Brody, S.D., Peacock, W.G., Vedlitz, A., Grover, H., 2008. Social vulnerability and the natural and built environment: a model of flood casualties in Texas. Disasters 32, 537–560. https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2008.01054.x

Zahran, S., McElmurry, S.P., Sadler, R.C., 2017. Four phases of the Flint Water Crisis: Evidence from blood lead levels in children. Environmental Research 157, 160–172. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.028

Zanchetta, G., Sulpizio, R., Di Vito, M.A., 2004. The role of volcanic activity and climate in alluvial fan growth at volcanic areas: an example from southern Campania (Italy). Sedimentary Geology 168, 249–280. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.04.001

Ženka, J., Slach, O., Krtička, L., Žufan, P., 2016. Determinants of microregional agricultural labour productivity – Evidence from Czechia. Applied Geography 71, 83–94. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.04.004

Zhai, G., Fukuzono, T., Ikeda, S., 2006. AN empirical model of fatalities and injuries due to floods in japan. Journal of the American Water Resources Association 42, 863–875. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04500.x

Zhang, G., Zhu, A.-X., Huang, Z.-P., Ren, G., Qin, C.-Z., Xiao, W., 2018. Validity of historical volunteered geographic information: Evaluating citizen data for mapping historical geographic phenomena. Transactions in GIS 22, 149–164. https://doi.org/10.1111/tgis.12300

Zhang, L., Nan, Z., Yu, W., Ge, Y., 2016. Hydrological Responses to Land-Use Change Scenarios under Constant and Changed Climatic Conditions. Environmental Management 57, 412–431. https://doi.org/10.1007/s00267-015-0620-z

Zhang, X., Arayici, Y., Abbott, C., Aouad, G., 2009. Integrating BIM and GIS for large scale (building) asset management: a critical review. USIR 16.

Zhao, Q., Myint, S., Wentz, E., Fan, C., 2015. Rooftop Surface Temperature Analysis in an Urban Residential Environment. Remote Sensing 7, 12135–12159. https://doi.org/10.3390/rs70912135

Zhao, X., Jiang, J., He, J., Song, Y., Achananuparp, P., Lim, E.P., Li, X., 2011. Topical Keyphrase Extraction from Twitter, in: Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Portland,. Presented at the Research Collection School Of Information Systems, Oregon, p. 12.

Introduction générale

Figure I.1 : Tendances évolutives du linéaire côtier du nord-ouest de l'Europe (données issues de l'*European Environment Agency*, 2012) 12
Figure I.2 : Exemples d'aléas affectant les environnements à falaises de Normandie 13
Figure I.3 : Approche et définition du risque et du multirisque retenues dans cette étude à travers l'exemple de Villerville dans le Calvados (14) (adapté de Thiery, 2007) 14
Figure I.4 : Démarche d'évaluation et de gestion des risques et du multirisque (modifiée d'après Crozier et Glade, 2005) 17
Figure I.5 : Les quatre possibilités de concomitance spatio-temporelle 18
Figure I.6 : Représentation schématique des chapitres et sections 24

Chapitre 1

Figure 1.1 : Schéma morphostructural entre la baie des Veys et la baie de Somme (issue de Letortu, 2013 et d'après Mégnien et Mégnien, 1980 ; Baize, 1998 ; Font, 2002 ; Hauchard *et al.*, 2002) 29
Figure 1.2 : Vues sur le littoral normand de la baie des Veys à la baie de Seine (clichés issus du Cerema, 2019) 30
Figure 1.3 : Vues sur le littoral normand sur la Côte d'Albâtre (de Etretat à la baie de Somme) 31
Figure 1.4 : Typologie des falaises et taux d'érosion (Costa *et al.*, 2019) 33
Figure 1.5 : Falaises (A) du mont Canisy à Benerville-sur Mer et (B) des Vaches Noires à l'ouest de Villers-sur-Mer (clichés O. Maquaire, 2017 *in* Cerema, 2019) 34
Figure 1.6 : Clichés des falaises vives et crayeuse du Pays de Caux depuis la plage 35
Figure 1.7 : Cumul annuel des précipitations sur la région Normandie (réalisation : Beauvais et Cantat, 2017 dans DREAL Normandie, 2019) 37
Figure 1.8 : Exposition et direction des vents trihoraires sur la période 1981 – 2010 sur les côtes normandes (*in* Letortu, 2012) 38
Figure 1.9 : Normales des températures et des précipitations sur la période 1981 – 2010 sur la station de Dieppe (76) et de Saint-Gatien-des-Bois (14) (données : Météo France) 39
Figure 1.10 : Définition des termes utilisés dans la morphologie des vallées littorales en Normandie 40
Figure 1.11 : Caractéristiques des bassins versants localisés sur les sites d'étude 42
Figure 1.12 : Profil en long et en travers de la vallée de La Touques et principaux paysages à l'exutoire du bassin versant : (A) vue sur le mont Canisy depuis le sud-est, (B) vue sur Deauville depuis le nord et (C) depuis l'ouest 43
Figure 1.13 : Profil en long et en travers des vallées Du Dun, de La Saâne, de La Scie et de L'Arques et principaux paysages à l'exutoire de ces bassins versants : (A) vue sur Dieppe depuis le nord et (B) vue à Quiberville depuis l'est 44
Figure 1.14 : Profil en long et en travers des vallées de L'Yères et de La Bresle et photographie aérienne de la basse vallée de L'Yères (vue depuis Criel-sur-Mer vers le nord-ouest) 45
Figure 1.15 : Débits mensuels sur 30 ans des bassins des sites d'étude (données issues de la Banque Hydro) 46
Figure 1.16 : Courants de marée et roses des houles à Cherbourg, Barfleur, Le Havre et Cayeux (données : modèle Courant 3D du SHOM, 1998 et catalogue sédimentologique des côtes françaises, 1986 – Roses des houles mises à jour à Cherbourg et Le Havre dans le catalogue sédimentologique des côtes françaises– Cerema, 2019) 50
Figure 1.17 : Trajectoire de quatre tempêtes majeures survenues en Manche, niveaux associés à un événement centennal et morphologie des côtes normandes 52
Figure 1.18 : Paramètres responsables des submersions marines en période ou hors période de tempête (modifié de Fichaut et Suanez, 2007 et de Letortu, 2013) 56
Figure 1.19 : Scénarios climatiques en lien avec une élévation du niveau marin RCP 2.6 et RCP 8.5 (IPCC, 2019) 57

Figure 1.20 : Densité d'habitants au km² et nombre d'habitants par communes (données issues de l'INSEE, 2011 et de Geofla, 2016) 59
Figure 1.21 : Occupation des sols de la région Normandie (données Corine Land Cover, 2012) 61
Figure 1.22 : Réseaux de transport en Normandie (données issues de l'IGN, 2017) 62
Figure 1.23 : Répartition de la population et occupation des sols sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) 65
Figure 1.24 : Réseaux d'énergies et de transport sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) 66
Figure 1.25 : Inventaire des mouvements de terrain sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) (BDmvt - BRGM, 2007) 68
Figure 1.26 : Localisation des quatre zones instables entre Trouville-sur-Mer et Cricquebœuf (issu de Lissak, 2012) 69
Figure 1.27 : Projet de zonage des aléas mouvements de terrain tiré des PPRmvt et zonage de la prédisposition aux glissements de terrain issue de la DREAL Normandie, 2004 70
Figure 1.28 : Projet de zonage de l'aléa inondation dans la basse vallée de la Touques (données issues du PPRI – DDTM 14, 2016) 71
Figure 1.29 : Localisation des bassins propices aux crues turbides dans la basse vallée de la Touques (digitalisation des bassins à partir du MNT à 5 m, données issues de la DDTM, 2016) 72
Figure 1.30 : Cartographie des zones basses (*i.e.* zone topographique en dessous d'un niveau marin de référence) sur le site d'étude n°1 (Auberville – Pennedepie) (données issues de DGPR, 2011) 73
Figure 1.31 : Répartition de la population et occupation des sols sur le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) 75
Figure 1.32 : Réseaux d'énergies et de transport sur le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) 76
Figure 1.33 : Inventaire des mouvements de terrain sur le site d'étude n°2 (Quiberville – Dieppe) (BDmvt – BRGM, 2007) 78
Figure 1.34 : Zonage de l'aléa inondation dans la basse vallée de l'Arques, de la Scie et de la Saâne (données issues du PPRi de L'Arques, de La Scie et de La Saâne – DDTM 76, 2012, 2016) 79
Figure 1.35 : Vallons propices aux crues turbides dans la basse vallée de l'Arques (données issues de la DDTM 76, 2009) 80
Figure 1.36 : Zonage de l'aléa submersion à Dieppe sur le site n°2 (données issues de la DDTM 76, 2018) 81
Figure 1.37 : Répartition des populations, occupation et usage des sols sur le site n°3 83
Figure 1.38 : Réseaux d'énergies et de transport sur le site d'étude n°3 84
Figure 1.39 : Inventaire des mouvements de terrain sur le site d'étude n°3 (Criel-sur-Mer – Ault) (BDmvt – BRGM, 2007) 86
Figure 1.40 : Zonage de l'aléa inondation dans la basse vallée de L'Yères et de La Bresle (données issues du PPRI – DDTM 76, 2016, 2018) 87
Figure 1.41 : Vallons propices aux crues turbides dans la vallée de l'Yères et de la Bresle (données issues de la DDTM, 2018) 88
Figure 1.42 : Synthèse de l'emprise des différents phénomènes connus sur les sites d'étude issue des zonages des aléas menés dans le cadre de la cartographie réglementaire PPR 91

Chapitre 2

Figure 2.1 : Échelles spatiales considérées dans les analyses de risque et exemples d'application 97
Figure 2.2 : Les approches utilisées dans un système par imbrication des échelles spatiales 98
Figure 2.3 : Unité spatiale d'observation et mode de représentation irrégulière communément utilisés dans les analyses de risque à différentes échelles d'analyse spatiale 100
Figure 2.4 : Synthèse des éléments exposés et des critères considérés dans 13 méthodes d'analyse des risques (inondation, glissement de terrain, multirisques) (Graff *et al.*, 2019b) 106

Figure 2.5 : Éléments exposés et critères d'analyse considérés aux différentes échelles spatiales (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.,* 2019b) 108
Figure 2.6 : Système d'évaluation utilisé dans le contrôle qualité des bases de données géographique pour la caractérisation des éléments exposés 112
Figure 2.7 : Environnement d'un modèle de processus ETL (adapté de Vassiliadis *et al.*, 2002) 116
Figure 2.8 : Modèle d'intégration et d'harmonisation « MSA » réalisé par *visual scripting* (sous *model builder* dans un environnement SIG) (Graff *et al.*, 2019b) 118
Figure 2.9 : Modèle d'intégration et d'harmonisation « LSA » réalisé par *visual scripting* (sous *model builder*) (Graff *et al.*, 2019b) 119
Figure 2.10 : Fonctionnement de la « précondition » des processus (toolbox) dans un environnement SIG (schéma issu d'ESRI, 2019 – https://pro.arcgis.com/) 120
Figure 2.11 : Système de combinaison des données « bâti » (IGN RGE®) et population par maille (INSEE) au sein du modèle « LSA » (Graff *et al.*, 2019b) 121
Figure 2.12 : Réalisation d'une toolbox pour caractériser les zones urbaines à une échelle d'analyse moyenne (dans le cadre du modèle MSA) 123
Figure 2.13 : Cumuls des surfaces et des linéaires des éléments exposés définis par le modèle MSA sur les trois sites d'étude (échelle d'analyse moyenne) (Graff *et al.,* 2019b) 125
Figure 2.14 : Représentation spatiale des éléments exposés issus de l'harmonisation des bases de données par le modèle MSA (Graff *et al.*, 2019b) 126
Figure 2.15 : Différences entre le nombre d'étages observés (*Fo*) et le nombre d'étages prédits (*Fp*) pour 381 bâtiments (Graff *et al.*, 2019b) 128
Figure 2.16 : Représentation 3D des résultats du modèle LSA à l'échelle large (zone d'activité située au sud de Deauville du site n°1) (Graff *et al.*, 2019b) 129
Figure 2.17 : Cartographie 3D des résultats du modèle LSA à échelle locale (Graff *et al.*, 2019b) 130
Figure 2.18 : Complémentarité des modèles d'harmonisation et moyens nécessaires à leur mise en place : l'exemple du centre hospitalier de Dieppe (76) 132
Figure 2.19 : Représentation cartographique (2D et 3D) des résultats issus des modèles MSA et LSA au site d'étude n°2 134
Figure 2.20 : Transposition du modèle MSA au site d'étude n°3 à une échelle moyenne 134
Figure 2.21 : Modèle d'intégration et d'harmonisation (ETL) des données dans le modèle cyberGIS (issu de de Liu *et al.*, 2018) 135

Chapitre 3

Figure 3.1 : Les différentes étapes de calcul de l'indice de dommages potentiels (PDI) pour estimer les conséquences à l'échelle régionale (d'après Puissant *et al.*, 2013) 144
Figure 3.2 : Les étapes du développement méthodologique du modèle de quantification APC (Affection, Pondération, Combinaison) développé et adapté de la méthode PDI (*Potential Damage Index*) 145
Figure 3.3 : Organisation générale du modèle de quantification APC (Affectation, Pondération et Combinaison) aux trois échelles d'analyse (Graff *et al.*, 2019a) 147
Figure 3.4 : Les modes de pondération possibles aux différents niveaux des données géographiques (attribut, critère, éléments exposés) 155
Figure 3.5 : Détermination des trois types de secteurs potentiellement sujets aux inondations, aux glissements de terrain et aux deux phénomènes (Graff *et al.,* 2019a) 156
Figure 3.6 : Profil schématique montrant les conditions retenues pour la détermination des trois types de secteurs potentiellement sujets aux inondations, aux glissements de terrain et aux deux phénomènes 157
Figure 3.7 : Arbre de décision n°1 (Dt_1) appliqué aux différentes catégories d'éléments exposés et à une échelle large afin de réajuster les valeurs de combinaison initiale (*Pc*) (Graff *et al.,* 2019a) 159

Figure 3.8 : Arbre de décision n°2 (Dt_2) appliqué aux différentes catégories d'éléments exposés et à une échelle locale afin de réajuster la valeur de combinaison initiale (Pc[f, l, m]) (Graff *et al.,* 2019a) 160
Figure 3.9 : Quantification et spatialisation des conséquences globales (OC) à une échelle moyenne (1 : 100 000 – 1 : 25 000) sur l'ensemble du territoire n°1 et zoom sur une vignette calée de part et d'autre de la vallée de la Touques (Graff *et al.,* 2019a) 162
Figure 3.10 : Critères utilisés pour la quantification des conséquences sur les infrastructures (*CI*) illustrés sur une vignette calée de part et d'autre de la vallée de la Touques du territoire n°1 (Graff *et al.,* 2019a) 164
Figure 3.11 : Calcul des conséquences infrastructurelles (*CI*) à une échelle large (1 : 25 000 – 1 : 10 000) réajusté en fonction du système de pondération (*Dt1*). Illustration sur une vignette calée de part et d'autre de la vallée de la Touques du territoire n°1 (Graff *et al.,* 2019a) 165
Figure 3.12 : Ensemble des critères utilisés pour la quantification des conséquences sur la structure des bâtiments (SC) et illustrés sur un zoom d'un secteur localisé sur la commune de Touques (Graff *et al.,* 2019a) 167
Figure 3.13 : Calcul des conséquences sur la structure des bâtiments (*SC*) à une échelle locale (1 : 10 000 – 1 : 2 000) réajusté en fonction du système de pondération (Dt_2). Illustration sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville (Graff *et al.,* 2019a) 169
Figure 3.14 : Conséquences sur la structure des bâtiments (*SC*) à une échelle locale par la combinaison des SC(f), SC(l) et SC(m). Illustration sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville (Graff *et al.,* 2019a) 170
Figure 3.15 : Illustrations des conséquences potentielles aux trois échelles (moyenne, large et locale) sur un secteur compris entre la commune de Touques et la zone d'activité située au sud de Deauville 172
Figure 3.16 : Système de combinaison des critères d'analyses des éléments exposés par *Deep learning* (réseau neuronal) (modifié d'après Li et Yeh, 2002) 174
Figure 3.17 : Évaluation des niveaux de risque par croisement de l'aléa inondation (DDTM, 2016) et des conséquences sur les infrastructures (bâtiments et réseaux) par une approche matricielle (qualitative) 176
Figure 3.18 : Essai de calcul matriciel du niveau de risque aux inondations à l'exutoire du bassin des Ouïs et des Valasses sur la commune de Touques 177
Figure 3.19 : Calcul d'un indice de risque à partir des conséquences potentielles (PDI) et d'un aléa (inondation) sur la commune d'Aiguilles (05) (issu de Carlier *et al.*, 2018) 178
Figure 3.20 : Essai de calcul d'un indice de risque (inondation) à l'exutoire du bassin des Ouïs et des Valasses sur la commune de Touques 179

Chapitre 4

Figure 4.1 : Les différents types d'événements pouvant affectées un territoire côtier et les événements concomitants liés aux débordements de cours d'eau 183
Figure 4.2 : Méthode d'analyse des concomitances grâce à un modèle de régression linéaire multiple (RLM) 186
Figure 4.3 : Variables hydrologiques, météorologiques et marines utilisées dans le modèle RLM 188
Figure 4.4 : Décalage (*i*) pouvant exister entre deux stations de mesure pour un même événement 189
Figure 4.5 : Localisation des stations de mesure hydrologiques sur La Touques 191
Figure 4.6 : Stations hydrologiques déployées à l'embouchure des rivières sur les sites d'étude n°2 et n°3 192
Figure 4.7 : Stations piézométriques disponibles sur les sites d'étude n°1 à n°3 192
Figure 4.8 : Chroniques de débit et de lame d'eau observée à l'embouchure de La Touques 193
Figure 4.9 : Chroniques de débit et de lame d'eau observée à l'embouchure du Dun 194
Figure 4.10 : Chroniques de débit et de lame d'eau observée à l'embouchure de L'Yères 194

Figure 4.11 : Chroniques de débit et de lame d'eau observée à l'embouchure de La Bresle 195
Figure 4.12 : Variations des niveaux piézométriques mesurés sur les stations de Surville (La Touques), de Fontaine-le-Dun (le Dun), Melleville (L'Yères) et de Beauchamps (La Bresle) 196
Figure 4.13 : Résultats des calculs du débit de base (*baseflow*) sur un extrait des chroniques de La Touques obtenues avec les trois méthodes *Fixed Interval Method* (FIM), *Sliding Interval Method* (SIM) et *Local Minimum Method* (LMM) 197
Figure 4.14 : Localisation des marégraphes et des bouées de mesure des vagues entre Deauville et le Tréport 198
Figure 4.15 : Chroniques de hauteurs d'eau observées en mer et surcote en mer calculée au marégraphe du port du Havre (où ZH = zéro hydrographique) 199
Figure 4.16 : Chroniques de hauteurs d'eau observées en mer et surcote en mer calculée au marégraphe du port de Dieppe (où ZH = zéro hydrographique) 200
Figure 4.17 : Calcul du cumul de la durée de blocage potentiel des écoulements 201
Figure 4.18 : Résultats du calcul des durées de blocage potentiel après harmonisation de la fenêtre temporelle sur le marégraphe du port du Havre (valeur maximum de cumul de la durée de blocage à la journée) 202
Figure 4.19 : Résultats du calcul des durées de blocage potentiel après harmonisation de la fenêtre temporelle sur le marégraphe du port de Dieppe (valeur maximum de cumul de la durée de blocage à la journée) 202
Figure 4.20 : Localisation des stations météorologiques du réseau Météo France 203
Figure 4.21 : Précipitations (PP) mesurées et précipitations efficaces (PP.Q) calculées aux stations météorologiques de Dieppe et de Saint-Gatien-des-Bois 204
Figure 4.22 : Chargement de la réserve utile (CHRU) et surplus hydrologiques (Sh) calculés aux stations météorologiques Météo France de Dieppe et de Saint-Gatien-des-Bois 204
Figure 4.23 : Réserve utile (RU) et reconstitution de la réserve utile (RRU) calculées aux stations météorologiques Météo France de Dieppe et de Saint-Gatien-des-Bois 205
Figure 4.24 : Analyse par composante principale (ACP) appliquée sur l'embouchure de La Touques ... 208
Figure 4.25 : ACP appliquée sur l'embouchure Du Dun 210
Figure 4.26 : ACP appliquée sur l'embouchure de L'Yères 211
Figure 4.27 : ACP appliquée sur l'embouchure de La Bresle 212
Figure 4.28 : Modèle de régression linéaire multiple LET_1 – Lame d'eau excédentaire sur La Touques pour la situation hydrodynamique n°1 223
Figure 4.29 : Modèle de régression linéaire multiple LET_2 – Lame d'eau excédentaire sur La Touques pour la situation hydrodynamique n°2 224
Figure 4.30 : Modèle de régression linéaire multiple LET_3 – Lame d'eau excédentaire sur La Touques pour la situation hydrodynamique n°3 224
Figure 4.31 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure de La Touques (modèles LET) 226
Figure 4.32 : Modèle de régression linéaire multiple LED_1 – Lame d'eau excédentaire sur Le Dun pour la situation hydrodynamique n°1 226
Figure 4.33 : Modèle de régression linéaire multiple LED_2 – Lame d'eau excédentaire sur Le Dun pour la situation hydrodynamique n°2 227
Figure 4.34 : Modèle de régression linéaire multiple LED_3 – Lame d'eau excédentaire sur Le Dun pour la situation hydrodynamique n°3 228
Figure 4.35 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure du Dun (modèles LED) 229
Figure 4.36 : Modèle de régression linéaire multiple LEY_1 – Lame d'eau excédentaire sur L'Yères pour la situation hydrodynamique n°1 230
Figure 4.37 : Modèle de régression linéaire multiple LEY_2 – Lame d'eau excédentaire sur L'Yères pour la situation hydrodynamique n°2 231
Figure 4.38 : Modèle de régression linéaire multiple LEY_3 – Lame d'eau excédentaire sur L'Yères pour la situation hydrodynamique n°3 231

Figure 4.39 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure de L'Yères (modèles LEY) 232
Figure 4.40 : Modèle de régression linéaire multiple LEB_1 – Lame d'eau excédentaire sur La Bresle pour la situation hydrodynamique n°1 233
Figure 4.41 : Modèle de régression linéaire multiple LEB_2 – Lame d'eau excédentaire sur La Bresle pour la situation hydrodynamique n°2 234
Figure 4.42 : Modèle de régression linéaire multiple LEB_3 – Lame d'eau excédentaire sur La Bresle pour la situation hydrodynamique n°3 234
Figure 4.43 : Lames d'eau excédentaires engendrées par les variables marines à l'embouchure de La Bresle (modèles LEB) 236
Figure 4.44 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure de La Touques 239
Figure 4.45 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure Du Dun 240
Figure 4.46 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure de L'Yères 241
Figure 4.47 : Analyse des lames d'eau totales et des lames d'eau excédentaires (blocage des écoulements par la mer) sur l'embouchure de La Bresle 241
Figure 4.48 : Influence des submersions marines dans les embouchures 243
Figure 4.49 : Indice de concomitance hydrologique (ICH) et date des tempêtes majeures en Manche 245
Figure 4.50 : Direction générale des tempêtes majeures en Manche de 1984 à 2018 249

Chapitre 5

Figure 5.1 : Hypothèse d'un débordement de cours d'eau avec et sans blocage des écoulements par la mer 256
Figure 5.2 : Occupation des sols sur la basse vallée de La Touques de la station hydrologique à Pont-L'Évêque jusqu'à Deauville et Trouville-sur-Mer 258
Figure 5.3 : Principaux paysages de la basse vallée de La Touques de Pont-L'Évêque à Deauville 259
Figure 5.4 : Aménagement présent le long de La Touques dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m) 260
Figure 5.5 : Occupation des sols sur la basse vallée du Dun de la station hydrologique à Bourg-Dun jusqu'à Saint-Aubin-sur-Mer 261
Figure 5.6 : Principaux paysages de la basse vallée du Dun de Ramouville à Saint-Aubin-sur-Mer 262
Figure 5.7 : Aménagements présents le long du Dun dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m) 263
Figure 5.8 : Occupation des sols sur la basse vallée de L'Yères de la station hydrologique à Touffreville-sur-Eu jusqu'à Criel-sur-Mer 264
Figure 5.9 : Principaux paysages de la basse vallée de L'Yères à Criel-sur-Mer 265
Figure 5.10 : Aménagements présents le long de L'Yères dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m) 266
Figure 5.11 : Occupation des sols sur la basse vallée de La Bresle de la station hydrologique à Ponts-et-Marais jusqu'à Le Tréport et Mers-les-Bains 267
Figure 5.12 : Principaux paysages de la basse vallée de La Bresle (Le Tréport, Mers-les-Bains et Eu) 268
Figure 5.13 : Aménagements présents le long de La Bresle dans la basse vallée littorale et profils en travers réalisés à partir du RGE Alti (5 m) 269
Figure 5.14 : Réseaux géodésiques sur le site d'étude n°1 (Houlgate à Honfleur) et n°2 (Quiberville à Dieppe) 271
Figure 5.15 : Marges d'erreur des MNT par caractérisation de l'écart type et du RMSE 272
Figure 5.16 : Trajectoire de la tempête Eleanor le 3 et 4 janvier 2018 (issu d'Info climat, 2018) 274

Figure 5.17 : Impact de la tempête Eleanor du 2 au 4 janvier 2018 en Manche 275
Figure 5.18 : Mesure des débits et des lames d'eau maximaux instantanés sur La Touques durant le mois de janvier 2018 275
Figure 5.19 : Débordements de cours d'eau après le passage de la tempête Eleanor le 4 janvier 2018.... 276
Figure 5.20 : Déplacement des tempêtes Lothar et Martin le 26 et 27 décembre 1999 (issue de La Chaine Météo, 2017) 277
Figure 5.21 : Mesure des débits et des lames d'eau maximaux instantanés sur Le Dun durant le mois de décembre 1999 278
Figure 5.22 : Débordement de L'Yères à Criel-sur-Mer le 26 décembre 1999 (clichés issus de la DDTM, 2016) 278
Figure 5.23 : Mesure des débits et des lames d'eau maximaux instantanés sur L'Yères durant le mois de décembre 1999 279
Figure 5.24 : Mesure du débit et de la lame d'eau maximum instantanés sur La Bresle durant le mois de décembre 1999 279
Figure 5.25 : Exemple d'intégration des contraintes physiques dans le paramétrage de la géométrie d'une basse vallée (dans le cas de La Touques) sous HEC RAS 284
Figure 5.26 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée de La Touques 285
Figure 5.27 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée Du Dun 286
Figure 5.28 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée de L'Yères 286
Figure 5.29 : Paramétrage de la géométrie de la basse vallée de La Bresle 287
Figure 5.30 : Comparaison de l'extension spatiale de la lame d'eau déterminée par l'analyse hydrogéomorphologique de La Touque (DDTM) et la modélisation HEC RAS 291
Figure 5.31 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau déterminées à partir de la cartographie du PPRi au droit des points de contrôle sur La Touques 292
Figure 5.32 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 97 %) dans la basse vallée de La Touques le 3 et 4 janvier 2018 293
Figure 5.33 : Comparaison de l'extension spatiale de la lame d'eau déterminée dans le PPRi du Dun et par la modélisation HEC RAS 295
Figure 5.34 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau issues des témoignages relatés dans le PPRi du Dun) 296
Figure 5.35 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 85 %) dans la basse vallée du Dun le 26 décembre 1999 297
Figure 5.36 : Extension spatiale de la crue de référence (26/12/1999) dans la basse vallée de L'Yères selon le PPR multi-aléas (DDTM, 2016) et la modélisation (ou modélisation ?) HEC RAS 299
Figure 5.37 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 67 %) dans la basse vallée de L'Yères le 26 décembre 1999 301
Figure 5.38 : Comparaison de l'extension spatiale de la lame d'eau déterminée dans le PPRi de la basse vallée de La Bresle (crue de référence) et par la modélisation HEC RAS 303
Figure 5.39 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau déterminées à partir de la cartographie du PPRi de La Bresle au droit des points de contrôle dans la basse vallée de La Bresle 304
Figure 5.40 : Résultats de la modélisation des situations avec un blocage (observation – 100 %) et sans un blocage des écoulements par la mer (prédiction – 61 %) dans la basse vallée de La Bresle le 27 décembre 1999 305
Figure 5.41 : Relation entre les valeurs de lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS et les lames d'eau déterminées à partir des cartographies PPR pour l'ensemble des basses vallées corriger lame d'eau au singulier 307
Figure 5.42 : Hypothèse du rôle de la morphologie des basses vallées lors d'un blocage des écoulements par la mer 309

Figure 5.43 : Variations de la lame d'eau excédentaire selon les différents secteurs (amont, centre et aval) et selon les aménagements hydrauliques 310
Figure 5.44 : Remplissage des zones de stockage des eaux durant une inondation avec et sans un blocage des écoulements par la mer 311
Figure 5.45 : Modélisation hydraulique d'un blocage des écoulements sur la basse vallée de L'Arques (non jaugée) lors de la tempête Lothar du 26 décembre 1999 314
Figure 5.46 : Modélisation hydraulique d'un blocage des écoulements avec + 1 m d'élévation du niveau marin pour une situation identique au débordement du 27 décembre 1999 (tempête Martin) sur la basse vallée de La Bresle 315

Chapitre 1

Tableau 1.1. Morphologie et pente moyenne des bassins des sites d'étude 47
Tableau 1.2. Temps de concentration (Tc) en heure des bassins versants selon les formules de Giandotti, Kripich et Passini 48
Tableau 1.3. Seuils marégraphiques aux ports du Havre et de Dieppe pour une référence altimétrique ZH (Zéro hydrographique) et Z NGF (IGN 69) (données issues du SHOM, 2017). 51
Tableau 1.4. Les événements de tempêtes majeures survenant dans La Manche du Cap d'Antifer au Cap de La Hague entre 1905 et 2018 (recensées par (1) Météo-France-France, (2) Vimer, (3) BRGM, (4) Levoy (1986), (5) DDTM 14, (6) Letortu (2013) ; données marines issues du Shom.fr, 2005. Réalisation K. Graff (Cerema, 2019).....53

Chapitre 2

Tableau 2.1. Éléments exposés et critères définis pour différentes méthodes d'analyse des risques liés aux inondations (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.,* 2019a) 102
Tableau 2.2. Éléments exposés et critères définis pour différentes méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.,* 2019b) 103
Tableau 2.3. Éléments exposés et critères définis pour différentes méthodes d'analyse multirisques (de l'échelle moyenne à l'échelle locale) (Graff *et al.,* 2019b) 104
Tableau 2.4. Sources et données utilisées pour la caractérisation des éléments exposés à l'échelle moyenne (M), large (L) et locale (l) (Graff *et al.*,2019b).....115
Tableau 2.5. Standards européens utilisés pour définir la hauteur moyenne par type de bâtiment 121
Tableau 2.6. Validation des attributs à la suite de l'harmonisation des données à l'échelle moyenne avec une marge d'erreur de 5 % (Graff *et al.*, 2019b) 127
Tableau 2.7. Nombre de bâtiments par type et par fonction sur le site n°1 aux différentes phases d'intégration du modèle LSA (Graff *et al.*, 2019).....128
Tableau 2.8. Détermination du niveau de confiance du modèle LSA (marge d'erreur de 5 %) 130

Chapitre 3

Tableau 3.1. Attribution et comparaison des valeurs d'indices aux attributs définis dans le cadre d'une analyse des conséquences globales à l'échelle moyenne 150
Tableau 3.2. Attribution et comparaison des valeurs d'indices aux attributs définis dans le cadre d'une analyse des conséquences sur les infrastructures à l'échelle large 151
Tableau 3.3. Attribution d'indice selon la capacité de la structure à résister à différents types d'événement à une échelle locale 153

Chapitre 4

Tableau 4.1. Caractéristiques des stations de mesure hydrologiques disponibles sur la Touques.....190
Tableau 4.2. Caractéristiques des stations de mesure hydrologiques disponibles sur les embouchures entre les sites d'étude n°2 et n°3 191
Tableau 4.3. Coefficient de détermination (R^2) des méthodes de calcul du débit de base.....197
Tableau 4.4. Seuils marégraphiques au port du Havre et de Dieppe selon le SHOM (2017).....201
Tableau 4.5. Inventaire des arrêtés CatNat entre 1984 et 2019 et nombre de communes touchées sur les sites d'étude n°1 (*S1*), n°2 (*S2*) et n°3 (*S3*). 214
Tableau 4.6. Synthèse des arrêtés CatNat survenus entre 1984 et 2019 sur les trois sites d'étude..... 215
Tableau 4.7. Inondations liées à des débordements de cours d'eau d'après les inventaires issus des plans de prévention des risques inondation (PPRi) 216

Tableau 4.8. Inventaire des inondations (débordement, submersion, ruissellement, etc.) issues de la DRIEE Île-de-France (2018)* 217
Tableau 4.9. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure de La Touques (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées) 218
Tableau 4.10. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure du Dun (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées) 219
Tableau 4.11. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure de L'Yères (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées) 220
Tableau 4.12. Synthèse et quantification des débordements de cours d'eau à l'embouchure de La Bresle (les valeurs en rouge sont des valeurs extrapolées) 221
Tableau 4.13. Nombre d'individus utilisés pour les modèles de régression linéaire multiple (RLM) en fonction des trois situations hydrodynamiques (S.H.) 221
Tableau 4.14. Synthèse des apports et marges d'erreurs des modèles de type « _1 », « -2 » et « _3 » par embouchure 236
Tableau 4.15. Synthèse des lames d'eau excédentaires pour les situations hydrodynamiques n°2 (situation de blocage potentiel des écoulements par la mer) 237
Tableau 4.17. Classement des embouchures selon l'indice ICHa (valeurs moyennes sur toutes les données) 243
Tableau 4.18. Classement des embouchures selon l'indice ICHb (valeurs moyennes sur les tempêtes majeures) 244
Tableau 4.21. Classement des tempêtes majeures survenues sur les quatre embouchures selon l'indice ICH 247
Tableau 4.16. Synthèse des lames d'eau (LE), des lames d'eau excédentaires (LE exc.) et de la contribution de la lame d'eau excédentaire sur la lame d'eau totale pour les modèles de type « _2 » 241
Tableau 4.19. Analyse et classement des embouchures selon les indices ICHa et ICHb calculés pour chacune des embouchures sur l'ensemble de la chronique (a) et pour huit tempêtes majeures (B) 246
Tableau 4.20. Indices de concomitances ICHb durant les huit tempêtes majeures survenues entre le 27 février 1990 et le 3 janvier 2018 247
Tableau 4.22. Comparaison des tempêtes majeures selon les indices ICH et l'indice de sévérité de Météo France (Cerema, 2019) et caractéristiques météo-marines des tempêtes majeures 248

Chapitre 5

Tableau 5.1. Comparatif des modèles numériques avec une résolution inférieure ou égale à 25 m disponibles sur les sites d'étude 270
Tableau 5.2. MNT préconisés aux différentes échelles d'analyses spatiales 273
Tableau 5.3. Caractéristiques des basses vallées étudiées en termes de longueur, surface, d'occupation des sols et d'aménagements hydrauliques et tempête modélisée par basse vallée 280
Tableau 5.4. Coefficient de rugosité de Manning appliqué selon les modes d'occupation des sols pour les différents profils (valeurs de coefficient issu de Papaioannou *et al.*, 2018) 288
Tableau 5.5. Synthèse des données hydrologiques et conditions limites intégrées à la modélisation HEC RAS par basse vallée 289
Tableau 5.6. Comparaison entre les valeurs des lames d'eau déterminées à partir de la cartographie du PPRi et les lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS au droit des points de contrôle sur La Touques 291
Tableau 5.7. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Touques durant la tempête Eleanor 293

Tableau 5.8. Comparaison entre les valeurs de lames d'eau issues des témoignages du PPRi du Dun (2010) et les lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS aux différents points de contrôle 295
Tableau 5.9. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée du Dun durant la tempête Lothar..... 298
Tableau 5.11. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de L'Yères durant la tempête Lothar 302
Tableau 5.12. Comparaison entre les valeurs des lames d'eau déterminées à partir des cotes NGF du plan d'eau (PPRi) et les lames d'eau calculées par la modélisation HEC RAS au droit des points de contrôle de La Bresle..... 304
Tableau 5.13. Volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS engendrés par un effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Bresle durant la tempête Martin..... 306
Tableau 5.14. Synthèse des lames d'eau, surface en eau et volumes d'eau excédentaires calculés avec HEC RAS pour chacune des basses vallées et caractéristiques morphologiques des basses vallées 307
Tableau 5.15. Ordres de grandeur des surfaces d'eau excédentaire supplémentaires et volumes d'eau excédentaire supplémentaires en cas d'inondation pour un centimètre de lame d'eau supplémentaire..... 308
Tableau 5.16. Etat des cours d'eau et de la part de blocage des écoulements durant les plus importantes inondations concomitantes à des tempêtes majeures dans les basses vallées d'étude 316

Sommaire 3

Remerciement 5

Résumé 9

Introduction générale 11

Contexte de la recherche 11
Objectifs de thèse 20
Soutiens institutionnels et choix des secteurs d'étude 21
Structure de la thèse 23

Chapitre 1. Contexte physio-géographique 25

1.1. Introduction du chapitre 27

1.2. Contexte environnemental régional 27

1.2.1. Contexte morphostructural 28

1.2.1.1. Les reliefs de la Normandie entre la baie des Veys et la baie de Somme 28
1.2.1.2. Une structure en bordure de bassin sédimentaire 32
1.2.1.3. Morphologie du Pays d'Auge et du Pays de Caux 33

1.2.2. Contexte météo climatique 35

1.2.2.1. Une région humide marquée par les influences océaniques 36
1.2.2.2. Exposition des côtes aux flux d'ouest 37
1.2.2.3. Variabilité saisonnière des températures et précipitations 38

1.2.3. Contexte hydrologique 39

1.2.3.1. Caractéristiques des bassins versants côtiers en contexte de falaise 40
1.2.3.2. Typologie des bassins versants côtiers 46

1.2.4. Contexte hydrodynamique 49

1.2.4.1. La mer de la Manche : un contexte macrotidal 49
1.2.4.2. Les événements de tempêtes majeures en Manche 51
1.2.4.3. Les principaux facteurs intervenant dans les submersions marines 55
1.2.4.4. Changements climatiques et impacts sur l'hydrodynamisme en Manche à l'horizon 2050 et 100 57

1.2.5. Un contexte sociétal à forts enjeux 58

1.2.5.1. L'hétérogénéité de la répartition de la population 59
1.2.5.2. Modes d'occupation des sols à l'échelle de la Normandie 60
1.2.5.3. Les réseaux de transport en Normandie 61

1.2.6. Conclusion sur le contexte environnemental régional 62

1.3. Trois sites d'étude normands adaptés aux analyses multirisques 63

1.3.1. Site d'étude n°1 : Auberville – Pennedepie 64

1.3.1.1. Contexte sociétal du site d'étude n°1 64
1.3.1.2. Phénomènes naturels affectant le site d'étude n°1 67

1.3.2. Site d'étude n°2 : Quiberville à Dieppe 74

1.3.2.1. Contexte sociétal du site d'étude n°2 74

1.3.2.2. Phénomènes naturels affectant le site d'étude n°2 ..... *77*

1.3.3. Site d'étude n°3 : Criel-sur-Mer à Ault 82

1.3.3.1. Contexte sociétal du site d'étude n°3 ..... *83*
1.3.3.2. Phénomènes naturels affectant le site d'étude n°3 ..... *85*

1.4. Conclusion du chapitre 89

Chapitre 2. Caractérisation des éléments exposés à différentes échelles spatiales. 93

2.1. Introduction du chapitre 95

2.2. Critères et résolution adaptés aux choix des échelles spatiales 96

2.2.1. Les échelles spatiales d'analyse et leurs modes de représentation 96

2.2.1.1. Les échelles spatiales considérées dans les analyses de risque *96*
2.2.1.2. Mode de représentation des éléments exposés *98*

2.2.2. Détermination des éléments exposés et des critères utilisés selon différentes méthodes d'analyse des risques 100

2.2.2.1. Les méthodes d'analyse des risques liés aux inondations *101*
2.2.2.2. Les méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain *102*
2.2.2.3. Les méthodes d'analyse multirisques *104*

2.2.3.Choix des éléments exposés et critères retenus à différentes échelles spatiales 105

2.2.3.1. Des éléments exposés et critères adaptés selon les catégories de vulnérabilité ... *105*
2.2.3.2. Adaptation des critères aux échelles spatiales *107*

2.2.4. Conclusion 109

2.3. Modèles d'intégration et d'harmonisation des bases de données 110

2.3.1. Inventaire et évaluation des bases de données géographiques 110

2.3.1.1. Détermination de la qualité des données et de la pertinence de l'information *111*
2.3.1.2. Les bases de données géographiques utilisées *113*

2.3.2.Intégration et harmonisation des données sur une base de modèle ETL 115

2.3.2.1. Principe de fonctionnement des modèles ETL *116*
2.3.2.2. Élaboration du modèle d'harmonisation à échelle moyenne (MSA) *117*
2.3.2.3. Élaboration du modèle d'harmonisation à échelle large et locale (LSA) *118*

2.3.3. Système de combinaisons des données et essai d'automatisation des modèles MSA et LSA 120

2.3.3.1. Détermination du critère « nombre d'étages » et « population estimée » *120*
2.3.3.2. Essai de développement de Toolbox permettant l'automatisation partielle du processus d'harmonisation *122*

2.3.4. Conclusion 123

2.4. Résultats du processus d'intégration et d'harmonisation des données 124

2.4.1. Analyse des résultats des modèles MSA et LSA 124

2.4.1.1. Résultats et calculs de la marge d'erreur du modèle MSA à l'échelle moyenne *124*
2.4.1.2. Résultats et calculs de la marge d'erreur du modèle LSA à l'échelle large *127*
2.4.1.3. Représentation 3D de la composante structurelle des éléments exposés à l'échelle locale *130*

2.4.2. Intérêts et limites d'une approche multiscalaire dans la caractérisation des éléments exposés par modélisation de processus ETL....131

2.4.2.1. Analyse des ressources nécessaires à la mise en place des modèles d'harmonisation et complémentarité des échelles....131

2.4.2.2. Transposabilité des modèles d'harmonisation 133

2.4.3. Conclusion....136

2.5. Conclusion du chapitre....137

Chapitre 3.Quantification et analyse des conséquences potentielles par une approche multiscalaire 139

3.1. Introduction du chapitre 141

3.2. Élaboration d'un modèle de quantification APC : Affectation, Pondération, Combinaison 142

3.2.1. Adaptation de la méthode PDI à un environnement côtier à falaise....143

3.2.1.1. Adaptation de la méthode PDI en méthode APC 143

3.2.1.2. Définition des conséquences potentielles aux échelles d'analyse spatiale 148

3.2.2. Affectation des indices aux attributs des critères d'analyse par une méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)....149

3.2.2.1. Affectation des indices aux attributs des critères d'analyse globaux à une échelle moyenne 149

3.2.2.2. Affectation des indices aux critères d'analyses des infrastructures à une échelle large....151

3.2.2.3. Affectation des indices aux critères d'analyse structuraux des bâtiments à une échelle locale 152

3.2.3. Mise en place des systèmes de pondération des données....154

3.2.3.1. Détermination des systèmes de pondération applicables aux différents niveaux des données géographiques....154

3.2.3.2. Spatialisation des secteurs sujets aux inondations et aux glissements de terrain1....55

3.2.4. Mode de combinaison des critères et application des systèmes de pondération 157

3.2.4.1. Les systèmes de combinaison : le lien entre l'attribution d'indice et les systèmes de pondération....158

3.2.4.2. Élaboration des arbres de décision et intégration à la phase de combinaison (pondération spatiale) 159

3.2.5. Conclusion 160

3.3. Analyse du modèle de quantification APC 161

3.3.1. Résultats du modèle obtenus aux trois échelles spatiales 161

3.3.1.1. Conséquences globales à une échelle moyenne (1 : 100 00e – 1 : 25 000)....161

3.3.1.2. Conséquences sur les infrastructures à une échelle large (1 : 25 000 – 1 : 10 000) 163

3.3.1.3. Conséquences sur la structure des bâtiments à une échelle locale (1 : 10.000 – 1 : 2000)....166

3.3.2. Intérêts et limites de la quantification des conséquences potentielles par une approche multiscalaire 171

3.3.2.1. Avantages de la méthode APC *171*
3.3.2.2. Limites et incertitudes du modèle APC *173*
3.3.2.3. Transposabilité ou reproductibilité de la méthode *173*
3.3.2.4. Développements futurs du modèle *174*

3.3.3. Conclusion 175

3.4. Intégration des conséquences potentielles à des analyses de risque 175

3.4.1. Essai d'évaluation du risque inondation par une approche matricielle 175

3.4.2. Essai d'intégration des conséquences potentielles à des calculs d'indices de risque 177

3.5. Conclusion du chapitre 179

Chapitre 4. Analyse statistique des concomitances hydrologiques 181

4.1. Introduction du chapitre 183

4.2. Fonctionnement du modèle de régression linéaire multiple (RLM) et données utilisées 187

4.2.1. Caractéristiques des modèles de régression linéaire multiple 187

4.2.1.1. Variables utilisées dans l'élaboration du modèle RLM *188*
4.2.1.2. Pas de temps considérés et situations hydrodynamiques *189*

4.2.2. Stations et chroniques de données disponibles 190

4.2.2.1. Stations et chroniques des données hydrologiques *190*
a. Localisation des stations de mesure hydrologique *190*
b. Chroniques des lames d'eau et de débit *193*
c. Calcul du débit de base *196*
4.2.2.2. Stations et chroniques des données marines *197*
a. Stations marégraphiques *197*
b. Chroniques de hauteurs d'eau et surcotes en mer *198*
c. Détermination de la durée de blocage potentielle de l'écoulement des rivières par la mer *200*
4.2.2.3. Stations et chroniques des données météorologiques *203*
a. Stations de mesure météorologique *203*
b. Chroniques météorologiques *203*
c. Calcul du bilan hydrique et hydrologique *205*

4.2.3. Données et variables intégrées aux modèles de régression 206

4.3. Situations hydrodynamiques et lames d'eau excédentaires dans les embouchures 207

4.3.1. Détermination des situations hydrodynamiques intégrées au modèle RLM 207

4.3.1.1. Situation hydrodynamique n°2 : dates propices au blocage des écoulements par la mer *208*
4.3.1.2. Situation hydrodynamique n°3 : Inventaire des dates d'inondation par compilation de multiples bases de données *213*
a. Compilation et analyse des bases de données sur les événements hydrogravitaires *213*
b. Synthèse des inondations historiques sur les sites d'étude *218*

4.3.2. Présentation des résultats des modèles RLM sur les effets de concomitance hydrologique 222

4.3.2.1. Réponse des lames d'eau à l'embouchure de la Touques (modèles LET) *222*

a. Caractéristiques des modèles LET *222*
b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure de La Touques *225*
4.3.2.2. Réponse des lames d'eau à l'embouchure du Dun (modèles LED) *226*
a. Caractéristiques des modèles LED *226*
b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure du Dun *228*
4.3.2.3. Réponse des lames d'eau à l'embouchure de L'Yères (modèles LEY) *229*
a. Caractéristiques des modèles LEY *229*
b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure de L'Yères *232*
4.3.2.4. Réponse des lames d'eau à l'embouchure de La Bresle (modèles LEB) *233*
a. Caractéristiques des modèles LEB *233*
b. Détermination des effets de blocage des écoulements à l'embouchure de La Bresle ... *235*

4.3.3. Synthèse des modèles LET, LED, LEY et LEB et des lames d'eau excédentaires 236

4.4. Analyse des effets de blocage des écoulements par la mer et élaboration d'un indice de concomitance ICH 237

4.4.1. Analyse des lames d'eau excédentaires pour les modèles de type « _2 » 238

4.4.2. Mise en indices des lames d'eau excédentaires 243

4.4.2.1. Classement des embouchures selon l'indice ICH *243*
4.4.2.2. Classement des tempêtes majeures (1984 – 2019) selon l'indice ICH *245*
4.4.2.3. Apport des indices ICH dans la compréhension des tempêtes majeures et de leurs effets dans les embouchures littorales *247*

4.4.3. Synthèse des principaux résultats 248

4.5. Conclusion du chapitre 250

Chapitre 5. Modélisation hydraulique des débordements de cours d'eau liés à des effets de concomitance avec la mer lors des tempêtes 253

5.1. Introduction du chapitre 255

5.2. Préparation des données intégrées à la modélisation hydraulique 257

5.2.1. Bassins d'études retenus pour l'application des modélisations hydrauliques 258

5.2.1.1. La basse vallée de La Touques *258*
5.2.1.2. La basse vallée Du Dun *261*
5.2.1.3. La basse vallée de L'Yères *264*
5.2.1.4. La basse vallée de La Bresle *267*

5.2.2. Choix des modèles numériques de terrain 270

5.2.2.1. Comparaison des MNT et de leurs résolutions *270*
5.2.2.2. Calculs des marges d'erreur topographiques *271*
5.2.2.3. Choix et résolution des MNT utilisés dans la modélisation *272*

5.2.3. Inondations intégrées à la modélisation hydraulique 273

5.2.3.1. Débordements de cours d'eau en lien avec la tempête Eleanor le 3 au 4 janvier 2018 ..... *274*
5.2.3.2. Débordements de cours d'eau en lien avec la tempête Lothar et Martin le 26 et 27 décembre 1999 ..... *276*

5.2.4. Synthèse des basses vallées étudiées et des données intégrées à la modélisation 280

5.3. Mise en place de la modélisation hydraulique sous HEC RAS 281

5.3.1. Fonctionnement global de la modélisation hydraulique HEC RAS 281

5.3.1.1. Résolution dynamique des équations de conservation de l'énergie 281
5.3.1.2. Résolution dynamique des équations de Barré de Saint-Venant, validation des modèles et méthode de calcul des surfaces et volumes d'eau excédentaires 282
5.3.1.3. Implémentation des contraintes physiques 284

5.3.2. Paramétrage de la géométrie des modèles et des flux liquides (conditions limites d'écoulement) 285

5.3.2.1. Élaboration de profils d'amont en aval des bassins d'étude 285
5.3.2.2. Intégrations des indices de rugosité de Manning 288

5.3.3. Conclusion sur le paramétrage de la modélisation hydraulique 289

5.4. Résultats des modèles hydrauliques sur les situations avec et sans blocage des écoulements par la mer en période de tempête 290

5.4.1. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée de La Touques 290

5.4.1.1. Calcul des marges d'erreur de la modélisation hydraulique par comparaison avec les cotes NGF du PPRi 290
5.4.1.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Touques (tempête Eleanor, 3 et 4 janvier 2018) 292

5.4.2. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée Du Dun 294

5.4.2.1. Calcul des marges d'erreur de la modélisation hydraulique de la basse vallée du Dun par comparaison aux lames d'eau du PPRi 294
5.4.2.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée Du Dun (tempête Lothar, 26 décembre 1999) 296

5.4.3. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée de L'Yères 298

5.4.3.1. Contrôle de la validité de la modélisation hydraulique de la basse vallée de L'Yères 298
5.4.3.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de L'Yères (tempête Lothar, 26 décembre 1999) 300

5.4.4. Validation et analyse du modèle hydraulique sur la basse vallée de la Bresle 302

5.4.4.1. Calcul des marges d'erreur de la modélisation hydraulique de la basse vallée de La Bresle par comparaison aux lames d'eau du PPRm 302
5.4.4.2. Présentation des modélisations hydrauliques HEC RAS avec et sans effet de blocage des écoulements par la mer dans la basse vallée de La Bresle (tempête Martin, 27 décembre 1999) 304

5.5. Analyse des effets de blocage des écoulements par la mer dans les basses vallées 306

5.5.1. Synthèse et analyse transversale des principaux résultats 306

5.5.2. Discussion et perspectives sur les effets de blocage des écoulements par la mer 312

5.6. Conclusion du chapitre 316

Conclusion générale **319**
Rappel du contexte et des objectifs de la recherche 319
Évaluation et analyse des enjeux par une approche multiscalaire 320
Analyse et quantification des concomitances hydrologiques 322
Perspectives : apport de ces travaux de recherche à une analyse multirisque 326

Références bibliographiques **329**
Table des figures **357**
Liste des tableaux **365**
Table des matières **369**
Annexes **377**

Annexe n°1 (p. 3736 – 404) :

GRAFF K., LISSAK C., THIERY Y., MAQUAIRE O., COSTA S. et LAIGNEL B., « Analysis and quantification of potential consequences in multirisk coastal context at different spatial scales (Normandy, France) », *Natural Hazards*, 2019a, 99, 2, p. 637-664.

Annexe n°2 (p. 405 – 424) :

GRAFF K., LISSAK C., THIERY Y., MAQUAIRE O., COSTA S., MEDJKANE M. et LAIGNEL B., « Characterization of elements at risk in the multirisk coastal context and at different spatial scales: Multi-database integration (normandy, France). », *Applied Geography*, 2019b, 111, p. 102076.

Natural Hazards (2019) 99:637–664
https://doi.org/10.1007/s11069-019-03763-5

ORIGINAL PAPER

Analysis and quantification of potential consequences in multirisk coastal context at different spatial scales (Normandy, France)

K. Graff[1,2] · C. Lissak[1] · Y. Thiery[3] · O. Maquaire[1] · S. Costa[1] · B. Laignel[2]

Received: 26 February 2019 / Accepted: 16 August 2019 / Published online: 21 August 2019
© Springer Nature B.V. 2019

Abstract

Coastal environment with high interaction between nature and societies is subject to multi-hazard interaction such as landslides, flood or cliff retreat. These territories are characterized by numerous elements at risk located in valley bottoms, front sea or at the outlets of small dry watershed. The aim is to quantify the potential consequences of EaR by integrating multiple hazards exposure at various scale analyses. To quantify the element at risk, three steps have been required. First, an initial rank has been attributed to each class of element at risk at three different scales analysis. Second, the potential consequences are weighted according to environmental dimension. Third, the consequences are combined with a linear combination of criteria in GIS environment. At medium-scale analysis, element at risk highlighted is built-up areas, national road, railway, lifeline and urban centers. At large-scale analysis, consequences concern any kind of house, apartment and complex located on multiple exposure areas. At local scale, consequences concern buildings located on multiple exposure areas with one floor in mixed materials and built after 1980. Thus, this method proposes an approach with multiple scales analysis and by integrating multiple exposure areas to quantify potential consequences. With the environmental dimension in element at risk analysis, it is an intermediate step to traditional risk analysis and, more specifically multirisk analysis without considering in this case the spatial and temporal dimension of hazards.

Keywords Consequences · Element at risk · Spatial scale · Weighting · Multi-criteria

1 Introduction

In coastal environments, damages caused by climatic, marine or continental processes could be more and more significant for societies in a context of global changes (IPCC 2013; Planton et al. 2015). Due to the multiple interactions of these processes, it is necessary to identify, analyze and regularly update risk areas and their potential evolutions. In this context, the concept of risk is built around three components: (1) spatialization

✉ K. Graff
kevin.graff@unicaen.fr

Extended author information available on the last page of the article

of hazard(s), (2) hazard frequency/intensity analysis and (3) the vulnerability assessment of element at risk elements (EaR) such as buildings, lifelines, agricultural surfaces and urbanized areas (Cardona 2005; Bollin and Hidajat 2006; Dilley et al. 2005; Birkmann 2007; Papathoma-Köhle et al. 2007). This definition involves an initial assessment of hazard followed by the vulnerability analysis which is defined as the potential losses/injuries of an EaR according to the intensity of hazard (Papathoma-Köhle et al. 2007; Birkmann et al. 2013; Chang et al. 2015, 2018). In a multirisk context, a hazard investigation may take some time and as part of a vulnerability assessment, EaR studies must be led independently of hazard analyses (Kappes et al. 2012b). In this context, for the first estimation of the potential losses/injuries of EaRs without considering hazard intensities or frequencies, we decided to focus on the assessment of potential consequences (Glade and Crozier 2005; Corominas et al. 2013; Puissant et al. 2013; Eidsvig et al. 2017; Carlier et al. 2018). Furthermore, potential consequences of EaRs represent the common vector of each single-hazard analysis in a multirisk assessment (Kappes et al. 2012a; van Westen et al. 2014; Godfrey et al. 2015; Chen et al. 2016).

According to scientific literature, two main approaches have been developed to assess EaRs and their potential consequences: the engineering approach, which is generally considered in an operational context, and the expert approach, which is usually used in a prevention context (Muis et al. 2015; Chen et al. 2016; Penadés-Plà et al. 2016). Among engineering approaches, methods such as damages curves or cost–benefit ratio provide an absolute value of each EaR expressed in monetary terms or degree of losses (Akbas et al. 2009; Totschnig et al. 2011; Papathoma-Köhle et al. 2017). However, the amount of data required to provide this analysis is huge and lead to considerable uncertainties in case of extrapolation to different study sites (van Westen et al. 2008; Petrucci and Gullà 2010; Kappes et al. 2012b; Li et al. 2016). Among expert approaches, methods such as ranking systems based on index value analysis or damage matrices provide a qualitative value (description in words) of EaRs based on subjective evaluation (Altenbach 1995; Léone et al. 1996; Malet et al. 2006; Papathoma-Köhle et al. 2017). Currently, used in urban French official documents such as the Natural Risk Prevention Plan (MEEM/MLHD 2016), these methods require only few data and can be implemented quickly (Kappes et al. 2012b; Puissant et al. 2013). In order to reduce uncertainties connected to these methods, index-oriented methodologies have been developed. The aim of these methods such as Potential Damage Index (PDI) is to compute the index value of various criteria to assess one or several EaRs by integrating a variable number of criteria (Maquaire et al. 2004; Birkmann 2006; Puissant et al. 2013; van Westen et al. 2014; Chang et al. 2015; de Brito and Evers 2016; Carlier et al. 2018). However, the PDI method is mainly used for mountainous environment (Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018).

Given this scientific context, three significant problems have been loomed. (1) Currently, no consensus has been reached about the number and nature of criteria to integrate an index-oriented method in multirisk coastal context. (2) Moreover, the spatial accuracy of potential consequences is usually done based on a one scale analysis, contrary to hazard analyses which commonly use a multiscale analysis approach. (3) Lastly, two approaches are used to assess potential consequences, inside or outside hazard areas. However, if outside hazard areas are the most appropriate approaches such as PDI method, they do not consider the immediate environment that can affect the EaR. Consequently, in our approach, we can define potential exposed areas to integrate the environmental specificities of the study site, such as topography or hydrology. Consequently, the challenge is to quantify potential multiscale consequences of EaRs in the same way as with hazard analysis.

We will then define the specific number and nature of criteria to be integrated in the consequences analysis and weight them based on their spatial location or importance.

In this way, we must adapt and improve the PDI method to a coastal context by integrating spatial location of EaR.

- The first step is to identify different types of consequences for each spatial scale to define adequate accuracy of EaR for mapping. Thus, four spatial scales are commonly used in risk analyses (van Westen 2000; 2008; Birkmann 2007). The small-scale analysis [1:250,000–1:100,000] is used by national and regional agencies (Carpignano et al. 2009). The medium-scale analysis [1:50,000–1:25,000] is used to identify critical facilities in urban documents (Kappes et al. 2011; Cascini et al. 2013; van Westen et al. 2014). The large-scale analysis [1:25,000–1:10,000] provides information about infrastructural components (Maquaire et al. 2004; Malet et al. 2006; Lissak et al. 2013). And the local-scale analysis [1:10,000–1:2000] provides detailed information about structural component of buildings (Papathoma-Köhle et al. 2007; Kappes et al. 2012a; Abbas and Routray 2013; van Westen et al. 2014). In this study we have considered scales ranging from medium to local extent. Beyond the medium scale [> 1:100,000], the mapping resolution does not provide enough information on the EaRs to differentiate them. Consequently, this scale is not considered in our study.
- The second step aims to integrate the notion of potentially exposed areas (to various processes) to delineate specific zones and to characterize more accurately the potential consequences of EaRs involved (Zahran et al. 2008; Jeffers 2013; Gallina 2015; Garcia-Aristizabal et al. 2015; Muis et al. 2015; Gallina et al. 2016; Yoon et al. 2017). The interest is also to propose consistent quantification EaRs to highlight hotspots through weighting systems and make them adaptable in different scenarios (Dilley et al. 2005; Fuchs et al. 2012; Armaş et al. 2016; de Brito and Evers 2016; Zahran et al. 2017).

2 Study site

The study area is located in Normandy from Houlgate to Honfleur (Fig. 1). The geographical limits are considered from three components: (1) a homogenous hydrological unit (the Touques watershed), (2) an continuity between the coast and the hinterland (coastal strip of 10 km wide) and (3) a homogeneous administrative unit (Plan for Development Consistency—SCOT Cœur Côte Fleurie). Therefore, the study area is at the interface between the outlet of the Touques River (104 km of length), the English Channel, and the outlet of the Seine estuary.

A range of hazards regularly affect these territories. Concerning the hydrological hazard, it comes from both the overflowing Touques River and a muddy flow in wet and dry valleys (especially in municipalities present in the study area that are subject to legal studies on both flood risk and landslide risk assessment, eastern part of the site) (Delahaye 2008; Douvinet et al. 2015a, b). Furthermore, the territories are regularly affected by marine submergence during strong tidal conditions (Costa 1997; Laignel et al. 2008; Letortu et al. 2014; Turki et al. 2015). Strong tidal coefficient will also partially block the Touques River, thus amplifying flood hazard in coastal back. This position along the Seine estuary also amplifies the blocking effects during the Seine river flood in conjunction with a strong tidal coefficient (Fisson et al. 2014; Fisson and Lemoine 2016). However, this area is partially protected from the North Sea's current and is affected differently than the other

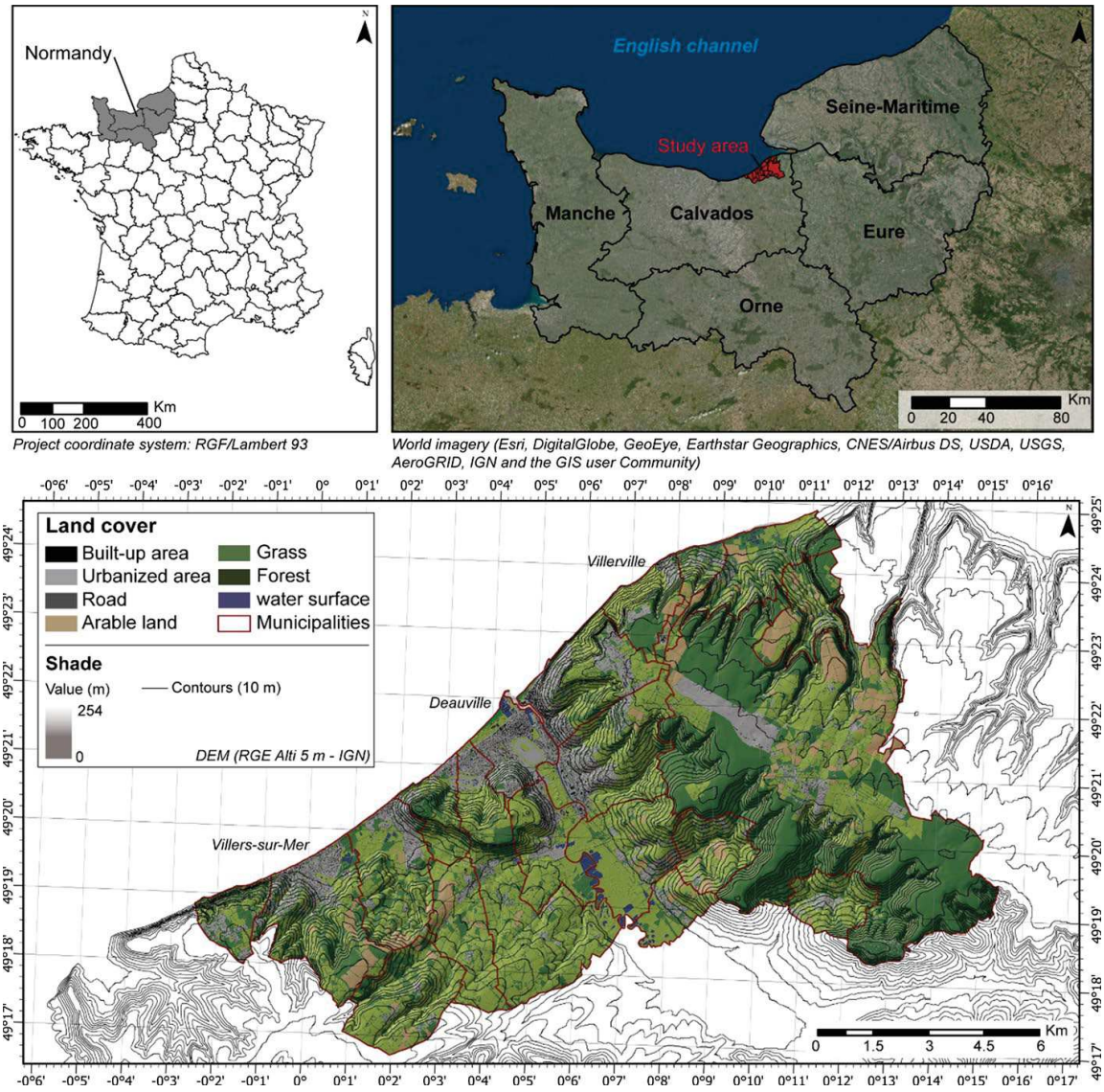


Fig. 1 Study site located in Normandy (France)

coast by severe storms. In addition, these territories are also subject to important gravity process such as slow-moving landslide (translational, rotational and complex). One can observe these processes along the coast (i.e., Vaches Noires cliffs and Cirque des Graves) (Maquaire 1990; Lissak et al. 2014) and in the hinterland (Fressard et al. 2014, 2016).

Despite the occurrence of these processes, the valley bottoms and the seafront are strongly anthropized, and theses environment are particularly sensitive to global changes. Indeed, these changes may bring about effective results and lead to an increase of heavy precipitation events in both moist and dried valleys, thus increasing the risk of muddy flows (Delahaye 2008; Douvinet et al. 2015a, b). These changes are also probably reflected in the rising water level and hence increase the risk of blockage of the Touques River at its outlet in the case of spatial and temporal concomitance (Kappes et al. 2012b; Marzocchi et al. 2012; Fisson and Lemoine 2016). Municipalities of the study site are subject to legal studies on both flood risk (plan for flood risk prevention) and landslide risk (plan for landslide risk prevention) (MEEM/MLHD 2016). This method consists in performing qualitative definitions of the various components of a territory. These documents are regularly reviewed and updated.

An appreciable set of data is available in order to assess and quantify the potential consequences on this study site. These data are supplied by national, regional or local collectivities. The site also benefits from many research data and from two research observatories (OMIV-INSU et DYNALIT) producing many data on hydrology, the volume of debris, subsurface displacements, local and regional weather.

3 Method

We developed a three-step method (Graff et al. 2019): (1) Once all criteria had been selected to describe EaR (e.g., at a larger scale, a building is characterized by the number of floors, its type and function, etc.), an index was attributed to each one of them to describe each EaR. The number of criteria increases depending on the scale used to perform the analysis. (2) The criteria were then combined for the different spatial scales to define potential consequences, and (3) weighting systems have been proposed to readjust potential consequences at the medium, large and local scales.

3.1 Definition and overview of the potential consequences at each spatial scale analysis

Three spatial scales analyses are defined to assess and quantify the potential consequences ranging from the medium- to local-scale analysis (Van Westen 2000; van Westen et al. 2008). Beyond > 1:100,000 EaRs are indistinguishable. All the data are obtained by combination of several databases available online or in the archives (Fig. 2).

The medium-scale analysis (1:100,000–1:25,000) enables the quantification of the overall potential consequences on the study site. The overall potential consequences here cover the built-up, urbanized area, transport and energy network and finally agricultural and natural surface types (Kubal et al. 2009; Scheuer et al. 2011). The built-up area type is the result of a simplification and aggregation of building footprint.

At the large-scale analysis (1:25,000–1:10,000), the potential consequences have been quantified on the basis of the infrastructures present in the study site. Infrastructures refer to the sets of human construction such as buildings, transport networks and energy networks (Cascini et al. 2013; Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018). Three components are considered:

1. the structural component is defined as the physical sheath such as type, construction materials and number or floors (Papathoma-Köhle et al. 2007; Uzielli et al. 2015);
2. the functional component is defined as a disruption of human activities such as business or farming (Totschnig et al. 2011; Lissak et al. 2013);
3. the physical injury component is defined as possible fatalities or injuries in human beings (Akbas et al. 2009; Kappes et al. 2012b).

The aim is to have a better accuracy of these EaRs. Contrary to the building and transport networks, the energy network is only characterized by its function.

At the local scale (1:10,000–1:2000), the EaRs considered are buildings with more integrated details and criteria. What we wish to focus on here is the structural component of these buildings in order to consider the material behavior (construction materials, building conditions such as level of damage to the walls and roof, the number

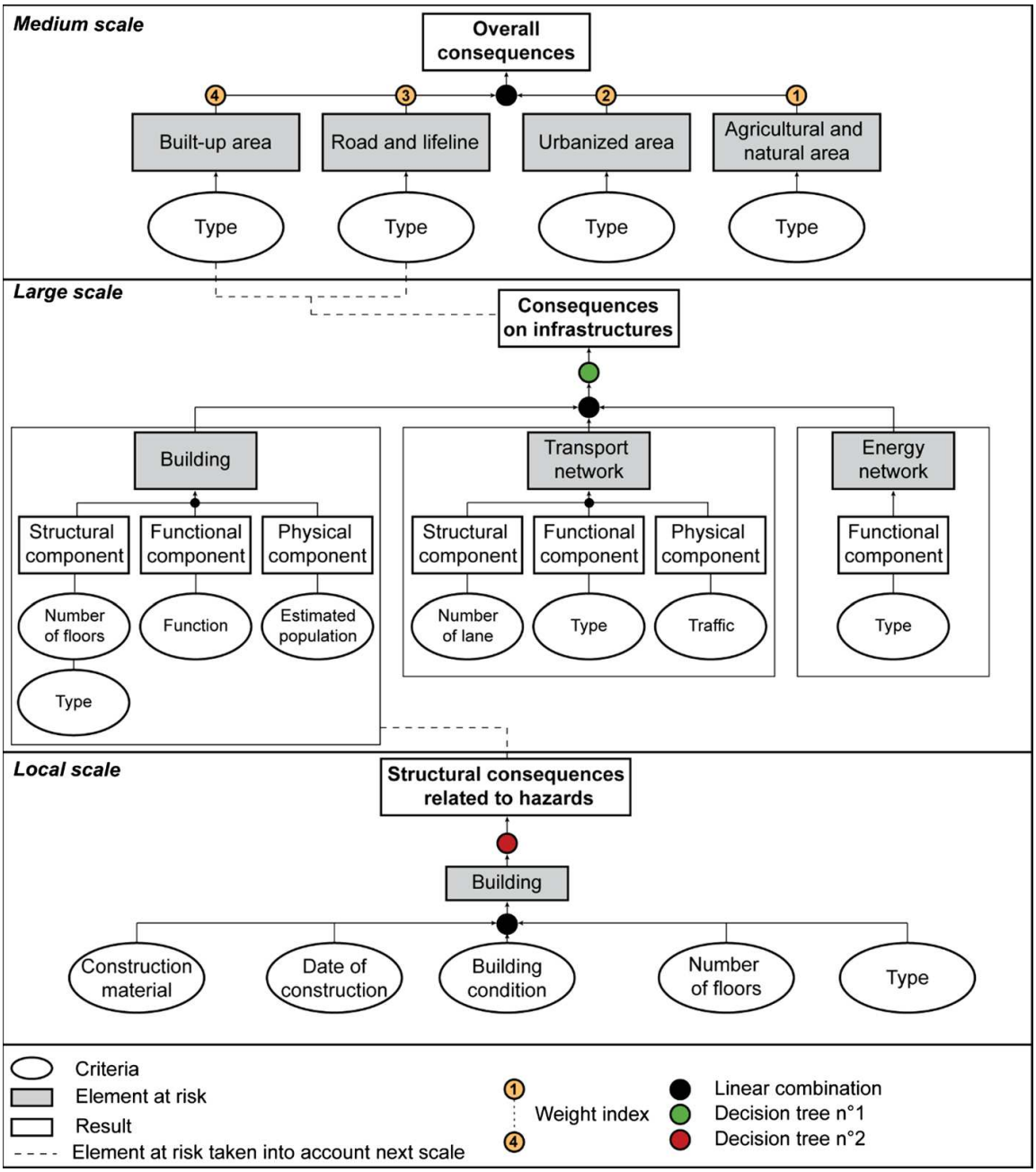


Fig. 2 General organization of the method at three different spatial scales analyses

of floors, type and construction date) in case of specific hazards (Kappes et al. 2012a; Godfrey et al. 2015; Papathoma-Köhle et al. 2017; Milanesi et al. 2018). To achieve that goal, five criteria have been chosen according to various studies carried out at this spatial scale (van Westen et al. 2014; Godfrey et al. 2015; Chen et al. 2016; Vojinovic et al. 2016; Papathoma-Köhle et al. 2017). These criteria are weighted according to two potential exposure areas present in the study site: (a) potential flood exposure areas that incorporate the overflow of rivers, marine submergence and muddy flows; (b) potential landslide exposure areas that incorporate translational, rotational and complex landslide. At this scale, the economic and social impact has been excluded due to a lack of available data such as costs at short, medium and long term ***o***f activities disposal or the visiting time of the residence (primary or secondary residence).

3.2 Multiple spatial scale index assignment

There are several possibilities to assign relative weight to EaRs. For example, the relative weight can be defined from statistical distribution or through membership value assigned by fuzzy logic approach that consists in transforming initial data into a new value called fuzzify process (Nezarat et al. 2015). Another option is to use the analytic hierarchy process to attribute a weight to different EaRs from the initial hierarchy (Saaty 2006; Nezarat et al. 2015). The pairwise comparison is also used and consists of comparing elements in pairs to establish a statistical relationship between a set of value (Saaty 2006; van Westen et al. 2008; Chen et al. 2013). Finally, we have chosen a ranking system to establish a relationship within a set of elements due to the ease of transposition (Mouroux and Brun 2006; Cooke et al. 2008; Khan and Samadder 2015; Gumus et al. 2016; Van der Fels-Klerx et al. 2018). Thus, the index values defined at the medium-, large- and local-scale analysis are presented in Tables 1, 2 and 3.

The ranking system has been chosen here to determine the value to each class of criteria thanks to the swift implementation and execution of this method consisting of an association of a set of criteria by adding or multiplying them (Maquaire et al. 2004; Kappes et al. 2012a, b; Lissak et al. 2013; Puissant et al. 2013; Papathoma-Köhle et al. 2017; Carlier et al. 2018). In an operational context, it is recommended to keep a simple approach owing to the swift implementation as well as the operational simplicity to compute the potential consequences (P_c) from different index (c) values. This linear combination consists in an addition of different criteria (1).

$$P_c = \sum_{i=1}^{n} \left(c_i\right) \tag{1}$$

At medium scale, a weighting index (w) has been used in order to readjust potential consequences (P_c) of EaRs depending on the degree of importance the municipality attaches to it (Maquaire et al. 2004; Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018). Then, this value has been standardized to obtain a final value between 0 and 1 in order to provide comparative information of consequences revealed by spatial scale analyses (Birkmann 2006, 2007). The result obtained is called the overall consequences (OCs) (2).

$$\mathrm{OC} = \sum_{i=1}^{n} \left(P_c \cdot w_i\right) \tag{2}$$

At large and local scale, new weighting systems have been used in order to incorporate the EaRs exposure levels (Puissant et al. 2013). To assign the right exposure index at each EaR of the study site, weighting systems have been set in order to incorporate the two decision trees. At large scale, the first decision (Dt_1) weights the P_c to obtain the consequences on infrastructures (CI) (3).

$$\mathrm{CI} = P_c \cdot Dt_1 \tag{3}$$

At local scale, the second decision tree (Dt_2) weights the P_c related to potential exposure area (e) to obtain the structural consequences (SC) (4).

$$SC = P_c(e).Dt_2 \tag{4}$$

Basing ourselves on the results obtained, we define appropriate threshold to classify the importance of consequences. Different methods exist to classify consequences: the

Table 1 Index defined on each class of criterion at the medium-scale analysis

Element at risk	Criteria	Class	Rank	Index
Built-up area	(a1) Type	Other	1	0.13
		Lightweight	2	0.25
		Residential	3	0.38
		Farm	4	0.5
		Industrial	5	0.63
		Commercial	6	0.75
		Monument	7	0.88
		Public	8	1.00
Road and lifeline	(a2) Type	Way	1	0.14
		Road	2	0.29
		Departmental road	3	0.43
		National road	4	0.57
		Highway	5	0.71
		Railway	6	0.86
		Power line	7	1.00
Urbanized area	(a3) Type	Area to be urbanized	1	0.09
		Leisure and tourism	2	0.18
		Farm	3	0.27
		Housing	3	0.27
		Camping	4	0.36
		Collective area	5	0.45
		Industrial area	6	0.55
		Commercial area	7	0.64
		Urban center	8	0.73
		Transport	9	0.82
		Public utilities	10	0.91
		Health and rescue	11	1.00
Agricultural and natural area	(a4) Type	Water surface	1	0.13
		Other	2	0.25
		Grassland	3	0.38
		Forest and wood	4	0.5
		Hedge	5	0.63
		Permanent crop	6	0.75
		Arable land	7	0.88
		Protected area	8	1

automatic method (e.g., natural breaks, quantile classification) or the empiric one such as relative cumulative frequency (RCF) methods (de Tsuzuki and Shimada 2003; Dimakos and Aas 2004; Wei and Chen 2009; Gaspar-Escribano and Iturrioz 2011; Puissant et al. 2013; Lai et al. 2015). Initially used in the PDI method, the RCF method has been applied to define thresholds as a consequence of frequency distribution (Puissant et al. 2013; Lissak et al. 2013; Fressard et al. 2014; Franci et al. 2016). This approach is based on the analysis of frequency distribution to determine the number of EaRs located above or below

Table 2 Index defined on each class of criterion at the large-scale analysis

Element at risk	Criteria	Class	Rank	Index
Building	(b1) Type	Shed/hut	1	0.09
		Warehouse	2	0.18
		House	3	0.27
		Farm	4	0.36
		Apartment	5	0.45
		Mixed used	6	0.55
		Industry	6	0.55
		Office	7	0.64
		Castle	8	0.73
		Church	8	0.73
		Monument	8	0.73
		Tower	8	0.73
		Commercial center	9	0.82
		Station	10	0.91
		Complex	11	1.00
	(b2) Function	Abandoned/none	0	0.00
		Garage, shed, etc.	1	0.09
		Religion	2	0.18
		Storage	2	0.18
		Residential	3	0.27
		Farm	4	0.36
		Commercial	5	0.45
		Industrial	5	0.45
		Mixed residential commercial	6	0.55
		Administrative	6	0.55
		Tourism	7	0.64
		Leisure	7	0.64
		Transport	8	0.73
		Education	9	0.82
		Energy	10	0.91
		Health and rescue	11	1.00
	(b3) Estimated population	0	0	0.00
		[1–2]	1	0.17
		[3–4]	2	0.33
		[5–6]	3	0.50
		[7–8]	4	0.67
		[9–10]	5	0.83
		> 10	6	1.00
	(b4) Number of floors	1	1	0.14
		2	2	0.29
		3	3	0.43
		4	4	0.57
		5	5	0.71
		6	6	0.86

Table 2 (continued)

Element at risk	Criteria	Class	Rank	Index
		> 6	7	1.00
Transport and energy network	(b5) Type	Way	1	0.11
		Road	2	0.22
		Departmental	3	0.33
		National	4	0.44
		Highway	5	0.56
		Power line	6	0.67
		Railway	7	0.78
		Pylon	8	0.89
		Other energy structure	9	1.00
	(b6) Traffic	Very low (5)	1	0.20
		Low (4)	2	0.40
		Standard (3)	3	0.60
		High (2)	4	0.80
		Very high (1)	5	1.00
	(b7) Number of lane	1 lane	1	0.17
		2 lanes with same direction	2	0.33
		2 lanes with opposite direction	3	0.50
		3 lanes with same direction	4	0.67
		3 lanes with opposite direction	5	0.83
		4 lanes or more	6	1.00

a specific threshold value. The threshold values can be adjusted in order to highlight a specific number of elements or determine a specific value that translates a type of consequences (low, medium, etc.) and reflects an expert vision.

3.3 Weighting systems (exposure)

On the basis of combination systems, we must reflect the exposure of EaRs by weighting the initial index value. There are two possibilities: (1) The initial index value is weighted with a specific value to readjust it (Fig. 2), or (2) the index value is readjusted according to the spatial location.

At the medium scale, the possibility (1) has been selected, in the same way as with the PDI method (Puissant et al. 2013; Lissak et al. 2013; Carlier et al. 2018). At this scale, the interest is to take account of all components of the territory in order to identify the main EaRs.

The large and local scales gave us the opportunity to highlight the potentially exposed EaRs. Two weighting systems are defined to readjust the P_c. It depends on the spatial location of EaRs (Marzocchi et al. 2012; Liu et al. 2015). Potential exposure areas are determined relative to the three points (Fig. 3):

- The first spatial location is defined by the potential exposure to flood-prone areas. This area is based on the distance from rivers to low-lying areas;

Table 3 Index defined on each class of criterion at the local-scale analysis

Element at risk	Criteria	Class	Index (flood)	Index (landside)
Building	(c1) Construction material	Pillar	0.20	0.20
		Concrete	0.40	0.30
		Metal	0.30	1.00
		Mixed	0.50	0.60
		Traditional	0.50	0.40
		Brick wall	0.50	0.40
		Wood	1.00	0.90
	(c2) Number of floors	1	1.00	0.40
		2	0.50	0.60
		3	0.30	0.60
		4	0.30	0.80
		5	0.30	0.80
		6	0.30	0.80
		> 6	0.30	1.00
	(c3) Construction date	< 1900	1.00	1.00
		[1900–1950]	0.90	0.90
		[1950–1970]	0.70	0.70
		[1970–1990]	0.50	0.50
		> 1990	0.30	0.30
	(c4) Building condition	Good	0.30	0.20
		Medium	0.50	0.50
		Bad	0.70	0.80
		Ruin	1.00	1.00
	(c5) Type	Other	0.00	0.00
		Shed/hut	0.09	0.09
		Warehouse	0.18	0.18
		House	0.27	0.27
		Farm	0.36	0.36
		Apartment	0.45	0.45
		Mixed used	0.55	0.55
		Industry	0.55	0.55
		Office	0.64	0.64
		Castle	0.73	0.73
		Church	0.73	0.73
		Monument	0.73	0.73
		Tower	0.73	0.73
		Commercial center/sale outlet	0.82	0.82
		Station	0.91	0.91
		Complex	1.00	1.00

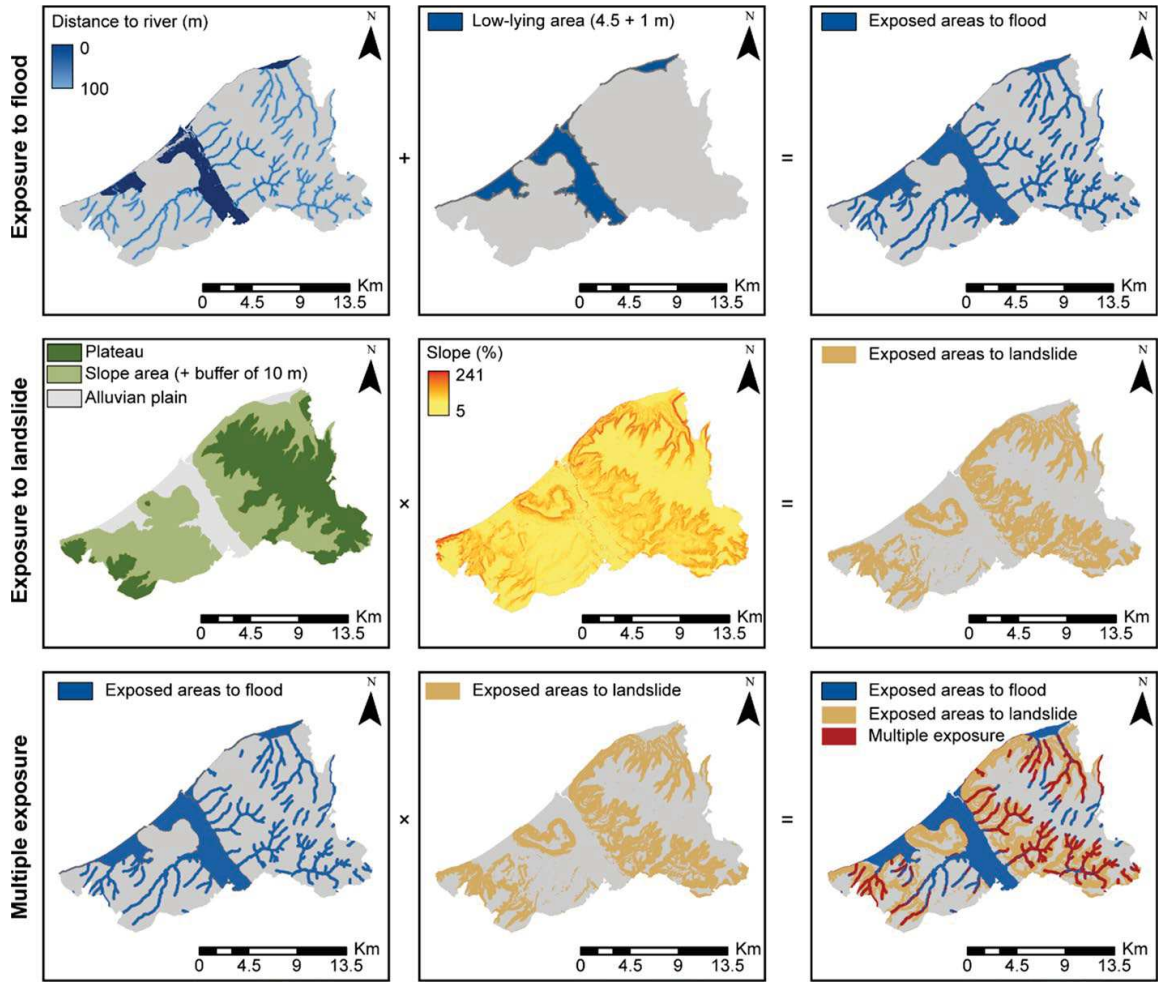


Fig. 3 Calculation of the three exposure levels. The flood-prone area is the merge of the distance to the river (0–100 m) and low-lying areas (4.5 m + 1 m of sea level for 100-year event), slope areas + buffer of 10 m from the top and the bottom of the slope to consider the ablation and propagation areas of landslides-prone areas with a slope threshold > 5%. Multiple exposure areas are the interaction between flood-prone and landslide-prone areas

- The second spatial location is defined by the exposure to landslide-prone areas computed from landform (slope areas + buffer of 10 m from the top and the bottom of the slope to take into account ablation and propagation areas of landslides) and a slope threshold > 5%;
- The third spatial location is defined by the multiple exposure computed from the interaction between flood-prone and landslide-prone areas.

Two decision trees have been developed in order to integrate the spatial location of EaRs on P_c at large- and local-scale analyses (3, 4). These decision trees iterate on EaRs from three operators: *true*, *false* and *while*. If an EaR is not concerned by an exposed area, the P_c value does not change. The operator *true* assigns the weight index related to the stage in progress. The operator *while* is a verification step that submits the EaRs to the next stage. The operator *false* returns to the previous value. At large scale, the interest is the first sorting step between what is potentially exposed (regardless of the type of area exposed) and what is not. In this first sorting, we differentiate single and multiple exposure areas (Fig. 4).

At the local scale, the identification of exposure areas aims to define different consequences according to the type of potential exposure areas. Thus, more criteria (structural

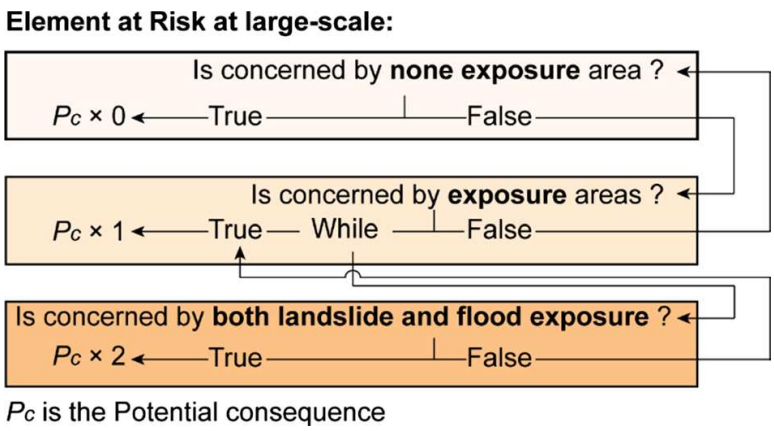


Fig. 4 Decision tree n°1 (Dt_1) applied to element at risk on a large scale in order to readjust potential consequences (P_c) according to the level of exposure

components) have been integrated to describe the potential consequences of EaRs. Consequently, three types of potential consequences have been defined related to flood exposure ($P_c(f)$), landslide exposure ($P_c(l)$) and multiple exposure ($P_c(m)$) computed from maximum values between $P_c(f)$ and $P_c(l)$ (Fig. 5).

A synthetic value of structural consequences regarding multiple exposure areas at local scale is computed from the sum of $P_c(f)$, $P_c(l)$ and $P_c(m)$.

4 Results

From the different indexes defined in a three-scale analysis, the linear combination and three weighting systems (including two decision trees at large and local scale) were able to define three types of consequences: (1) overall consequences (OCs) at medium scale, (2) consequences on infrastructure (CI) at large scale and (3) structural consequences (SC) at local scale. For all scales analyses considered, we classified different types of consequences (OC, CI and SC) in four classes (low, medium, high and very high) by using RCF similarly to the initial PDI method.

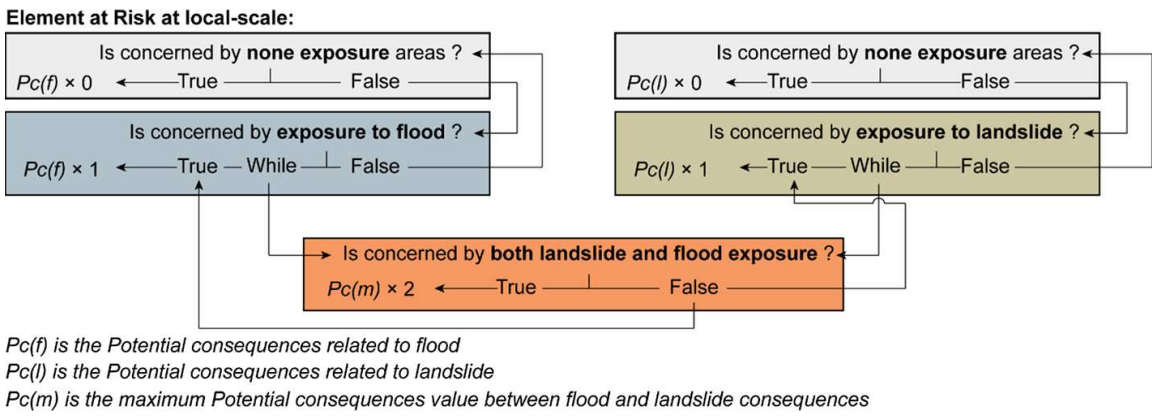


Fig. 5 Decision tree n°2 (Dt_2) applied to element at risk on a local scale in order to readjust potential consequences according to their different spatial location inside different types of potential exposure areas (P_c(f, l or m))

4.1 Overall consequences at medium-scale analysis (1:100,000–1:25,000)

At medium-scale analysis, overall consequences (*OCs*) are computed from the sum of four criteria: (a1) built-up type, (a2) road and lifeline type, (a3) urbanized area type and (a4) agricultural and natural surface type. Feature scaling method has been used to standardize the *OC* index in the range of [0, 1] (Fig. 6).

In very high consequences (3% of the total surface area), five elements are highlighted: built-up areas (all types), national roads, railways, lifelines (all types) and urban centers. In high consequences (9% of the total surface area), four elements are highlighted: activity areas (industrial and commercial), collective residential areas, arable lands and departmental roads. In average consequences (48% of the total surface area), four elements are highlighted: residential (individual) areas, protected areas (zone of floristic, faunal and ecological value and hedge as ecological corridor), touristic areas (garden, park, equipped beach, golf, etc.) and communal roads. Finally, areas to be urbanized, grasslands, scrubs, woods, water surfaces and other natural elements result in low consequences (40% of the total surface area).

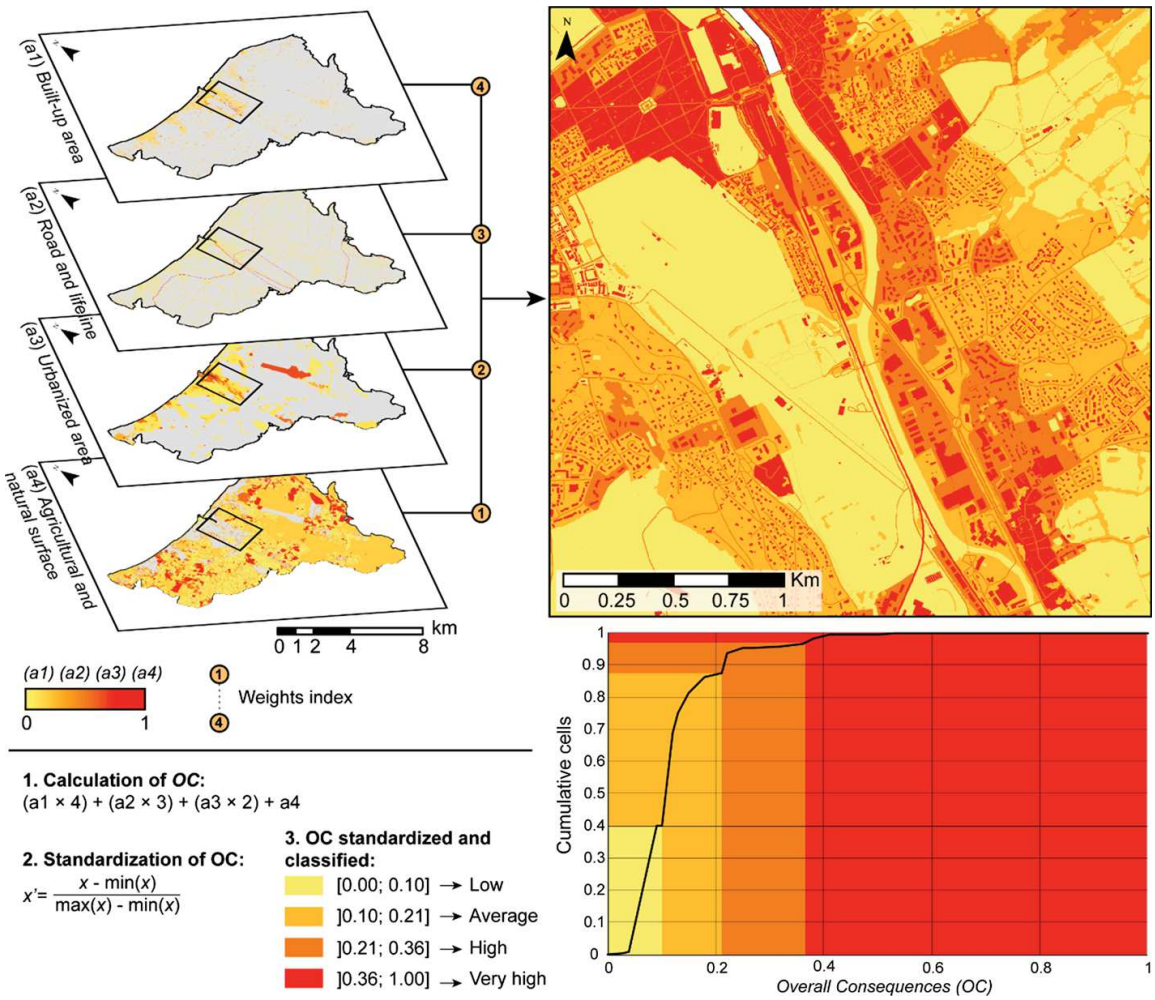


Fig. 6 Quantification of overall consequences at medium-scale analysis

4.2 Consequences on infrastructures at large-scale analysis (1:25,000–1:10,000)

At large-scale analysis, the consequences on infrastructure are computed from buildings, transport networks and energy networks. For buildings and transport networks, the physical, functional and structural components are taken into account. For energy networks, the functional component is considered. The sum of type, number of floors, function and estimated population by building index have been realized on 31,251 buildings. The sum of traffic, number of lanes and type of roads index have been realized on 1201.3 km transport networks. Finally, 35.2 km energy networks have been identified (Fig. 7).

Once the set of criteria is identified and merged, we have used the first decision tree (Dt_1) to sort EaRs depending on their spatial location and target high infrastructural potential consequences (Fig. 8).

On 31,251 buildings, 9967 (32%) are located outside the potential exposure areas. Low consequences represent 12,140 buildings (39%) and concern mainly any type of hut or residential houses with one floor and no estimated population inside and located in an exposure area. Average consequences represent 6080 buildings (19%) and concern

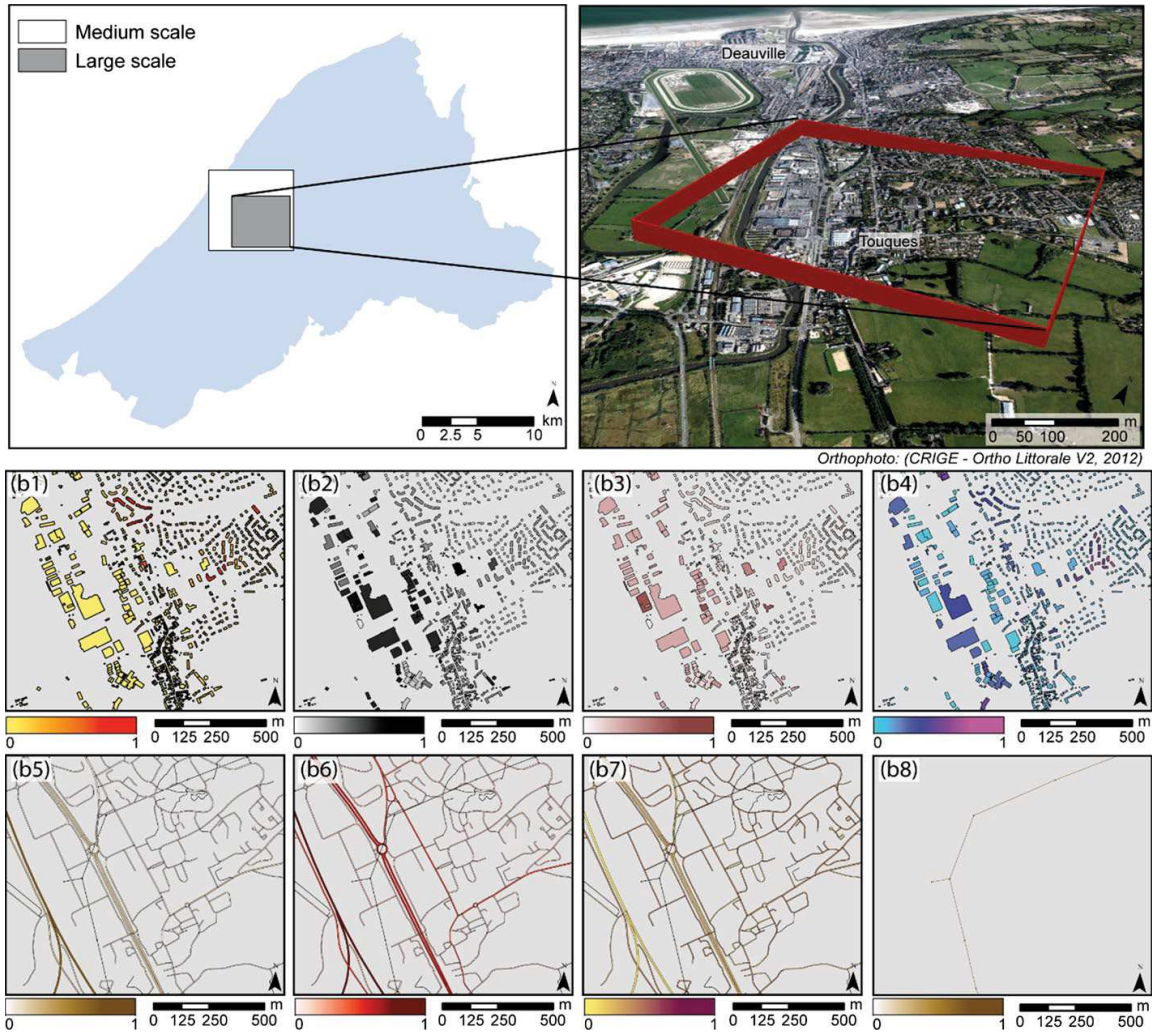


Fig. 7 Set of criteria used to quantify consequences on infrastructure (CI) at large-scale analysis. (b1) Index of the estimated population by building; (b2) index of the type of building; (b3) index of the function of building; (b4) index of the number of floors; (b5) index of the type of transport networks; (b6) index of the traffic; (b7) index of the number of lanes (transport network); (b8) index of the type of energy networks

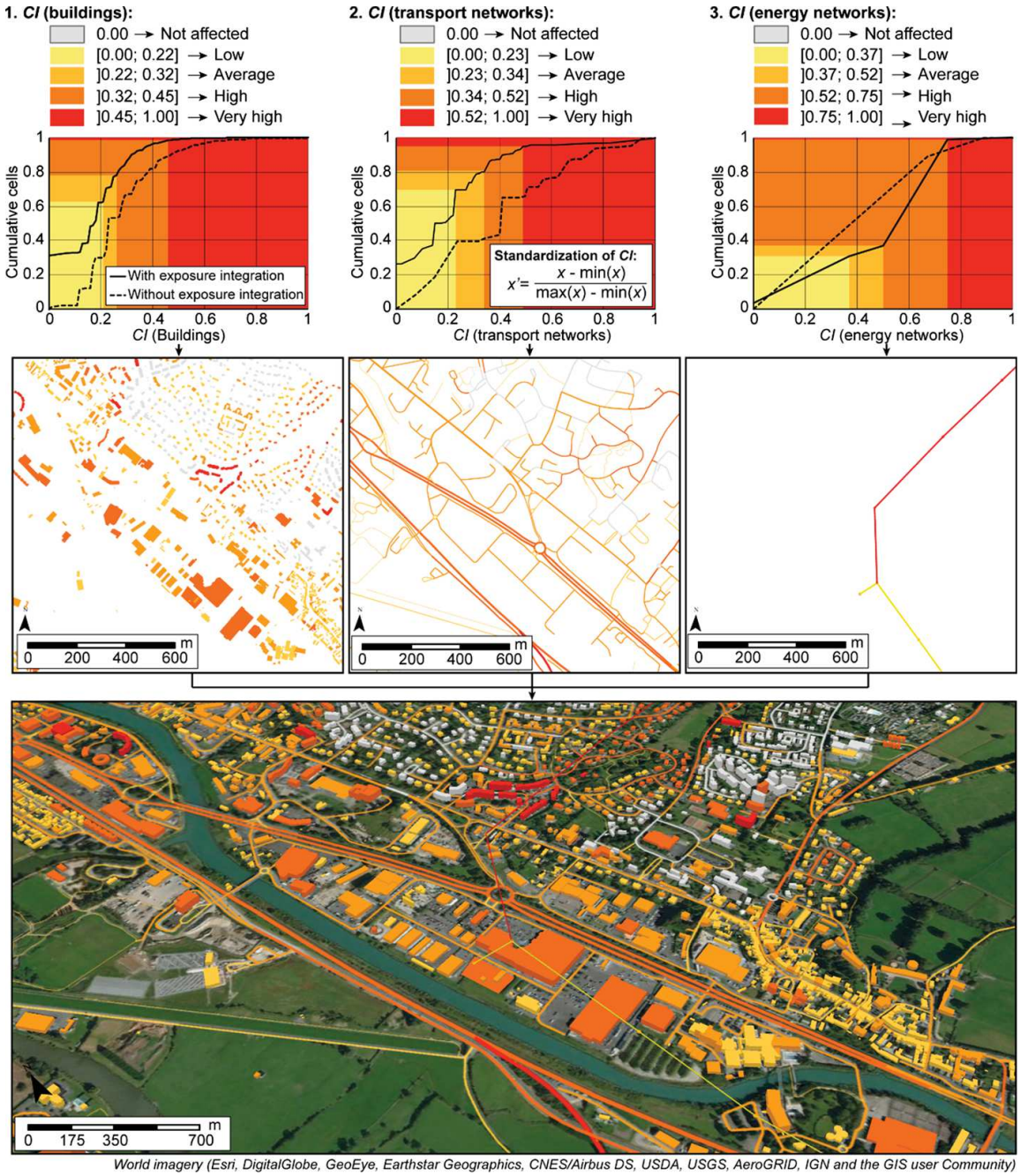


Fig. 8 Consequences on infrastructure (CI) at large-scale analysis. The CI presented are weighted according to the exposure level of element at risk through a decision tree in GIS environment

mainly residential apartment with at least three floors and an estimated population index under 0.5 located in exposure area. High consequences represent 2458 buildings (8%) and concern mainly commercial, industrial or administrative complexes, generally composed of three or more floors and located in exposed area. Very high consequences represent 605 buildings (2%) and concern any kind of house, apartment and complex located on multiple exposure areas. It equally concerns health or rescue institutes located in a zone of a low exposure.

Among the 1201.3 km of transport networks, 324.4 km (27%) are situated outside the potential flood or landslide exposure areas. Low consequences represent 516.6 km of networks (43%) and concern mainly any kind of way or road with two lanes (double

direction) and traffic index value of 0.2 or less located in exposure area. Average consequences represent networks of 120.1 km (10%) and concern mainly roads with two lanes (double direction) and a traffic index value equal to or greater than 0.5 located in an exposure area. High consequences represent networks of 192.2 km (16%) and concern departmental roads and roads located in multiple exposure areas or highways located in an exposure area. Very high consequences represent networks of 108.1 km (9%) and concern railways and national roads with a traffic index value equal to or greater than 0.8 located in multiple exposure areas.

Among the 35.2 km energy networks identified, 0.7 km (2%) are outside the potential flood-prone or landslide-prone areas. Low consequences represent 9.9 km (28%) and concern power lines in exposed areas. Average consequences represent 2.1 km (6%) and concern pylons in exposed areas. High consequences represent 22.2 km (63%) and concern power lines in multiple exposure areas. Very high consequences represent 0.4 km (1%) and concern pylons in multiple exposure areas.

4.3 Structural consequences related to hazard at local-scale analysis (1:10,000–1:2000)

At the local scale, the aim is to quantify more precisely the structural consequences (SC) of buildings related to different potential exposure areas. We have chosen five criteria currently used in multirisk literature to precise this component (against two at large scale): (1) the type of building, (2) the construction materials, (3) the building condition, (4) the number of floors and (5) the construction date (Kappes et al. 2012a; van Westen et al. 2014; Godfrey et al. 2015; Chen et al. 2016). An index has been defined according to the relationship between each criterion of each building, and the various hazards have been taken into consideration. Therefore, flood and landslide exposure have been taken into consideration in order to attribute an index to each criterion, and the maximum of both values have been chosen in case of multiple exposure. At this scale, 861 buildings have been analyzed (from multiple geographical databases and data field acquisition). They are located between Touques and the southern part of Deauville (Fig. 9). This site is partially affected by both landslide and flood exposure (Delahaye 2003; Douvinet 2006; Douvinet et al. 2009, 2015a, b).

For each type of potential exposure area (flood, landslide and multiple), we have combined different types of criteria such as $\mathrm{c1+c2-fd+c3-fd+c4-fd+c5}$, then $\mathrm{c1+c2-ls+c3-ls+}$, etc. Then, they are weighted with the second decision tree (Dt_2) and standardized with a feature scaling method. The linear combination of different structural index values is readjusted according to their spatial location and presented below (Fig. 10).

For SC (flood), about 861 buildings were identified, of which 122 (14%) are outside the potential flood exposure area. Low consequences represent 301 buildings (35%) and mainly concern houses in traditional materials built after 1990 in good state with two floors (Fig. 11). Average consequences represent 186 buildings (22%) and concern mainly houses or flats with two or three floors built in traditional or concrete materials between 1950 and 1970. High consequences represent 99 buildings (11%) and concern complexes, warehouses, commercial centers and industry in mixed materials with two floors or more. Also, it concerns houses with one floor built before 1970 in traditional materials. Very high consequences represent 88 buildings (10%) and concern building in bad conditions, gas stations, complexes commercial centers and industries with one floor built in mixed materials.

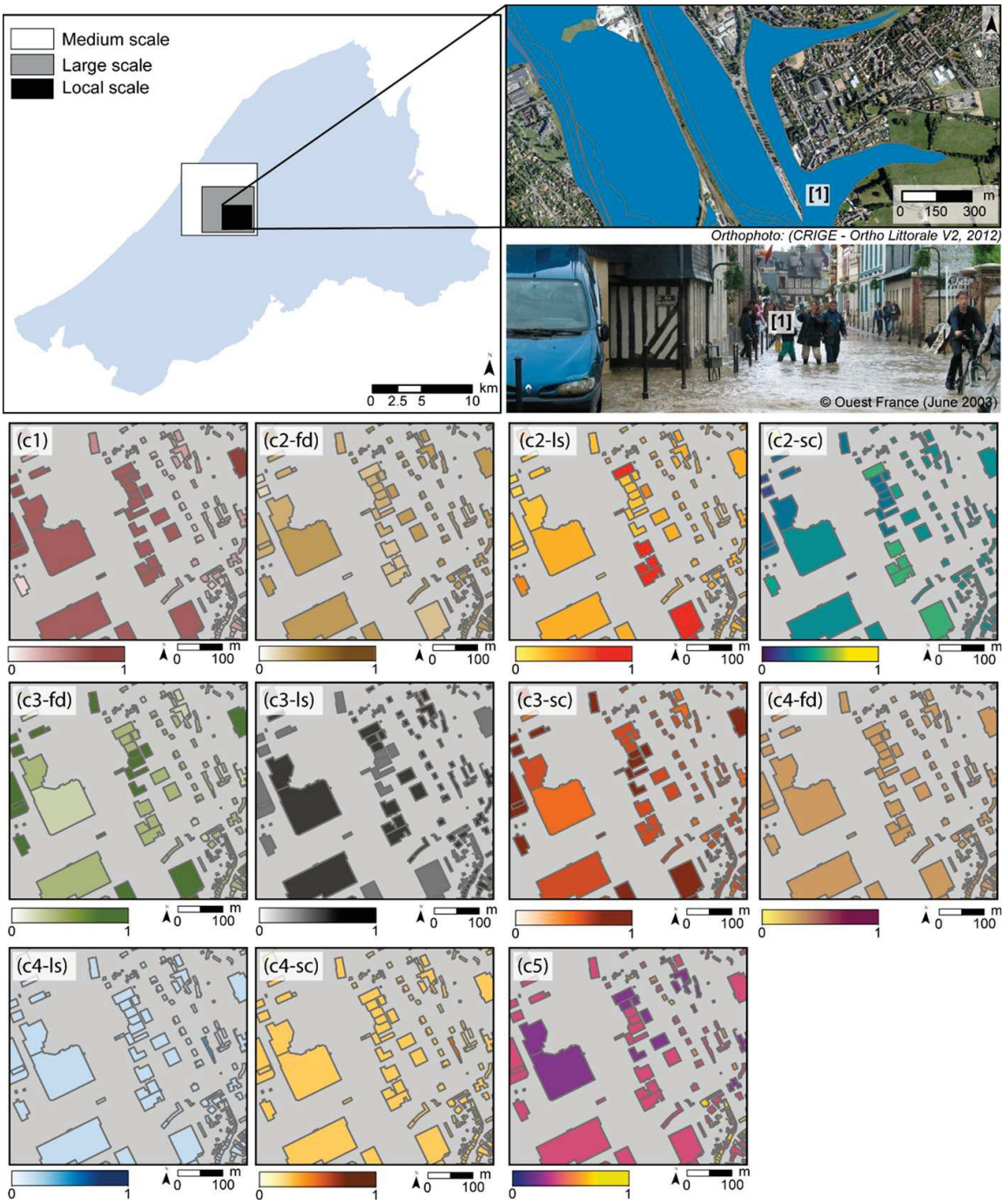


Fig. 9 Set of criteria used to quantify structural consequences (SC) at local-scale analysis. The picture represents the flash flood of June 1, 2003, that generated 5.3 million euros of damages and on death. (c1) is the index value of the type of building; (c2-fd) is the index value of construction material related to flood; (c2-ls) is the index value of construction material related to landslides; (c2-sc) is the index value of construction material related to spatial concomitance. (c3-fd) is the index value of the number of floors related to flood; (c3-ls) is the index value of the number of floors related to landslides; (c3-sc) is the index value of the number of floors related to spatial concomitance. (c4-fd) is the index value of the building condition related to flood; (c4-ls) is the index value of the building condition related to landslides; (c4-sc) is the index value of the building condition related to spatial concomitance. (c5) is the index value of the construction date of building

For SC (landslide), about 861 buildings were identified, of which 759 (88%) are outside the potential landslide exposure areas. Low consequences represent 13 buildings (1.5%), such as houses with one or two floors, in traditional materials (good state), and built after

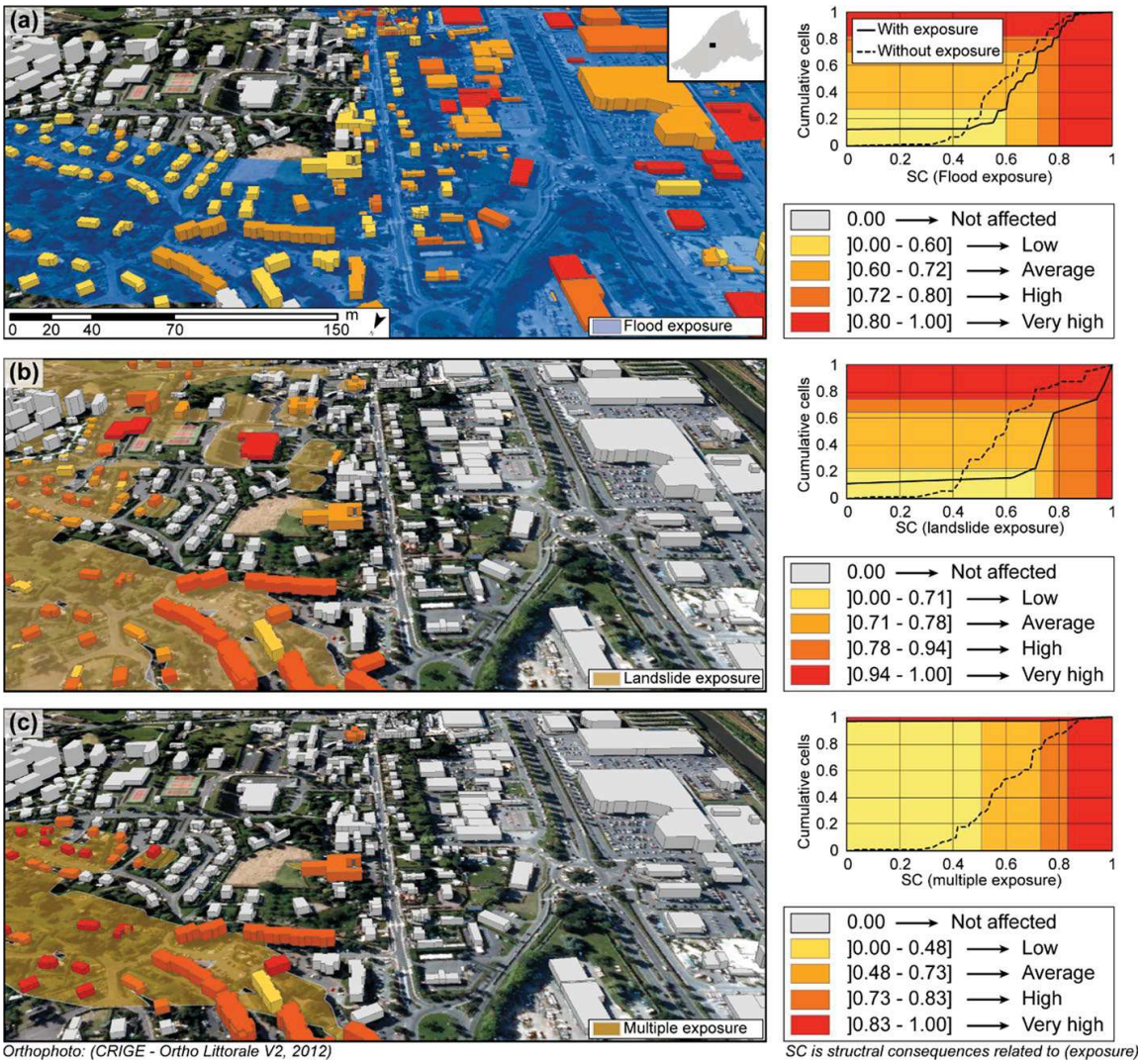


Fig. 10 Structural consequences (SC) readjusted according to weighting system (Dt_2) at local-scale analysis. **a** Structural consequences related to potential flood exposure; **b** structural consequences related to potential landslides exposure; **c** structural consequences related to potential multiple exposure

1990. It concerns equally sheds and huts. Average consequences represent 6 buildings (0.7%) and concern flats with two or three floors in traditional or concrete materials (good state) built after 1990. High consequences represent 18 buildings (2%) and concern flats and houses with three or more floors, in traditional or concrete materials (good state) and built before 1980. Very high consequences represent 30 buildings (3%) and concern monuments, complexes and flats with more three floors in traditional materials (good state) and built before 1980.

For SC (multiple exposure), about 861 buildings were identified, of which 110 (13%) are outside the potential multiple exposure areas. Low consequences represent 151 buildings (18%) and concern sheds and houses built after 1990 in traditional materials (good state), with two floors. Average consequences represent 338 buildings (39%) and concern houses with two floors, built in traditional materials (good state) before 1990. High consequences represent 172 buildings (20%) and concern houses with two or three floors built before 1980 in traditional materials. Very high consequences represent 90 buildings (10%) and concern flats or houses with three or more floors built between 1980 and 1990 in traditional or concrete materials (good state).

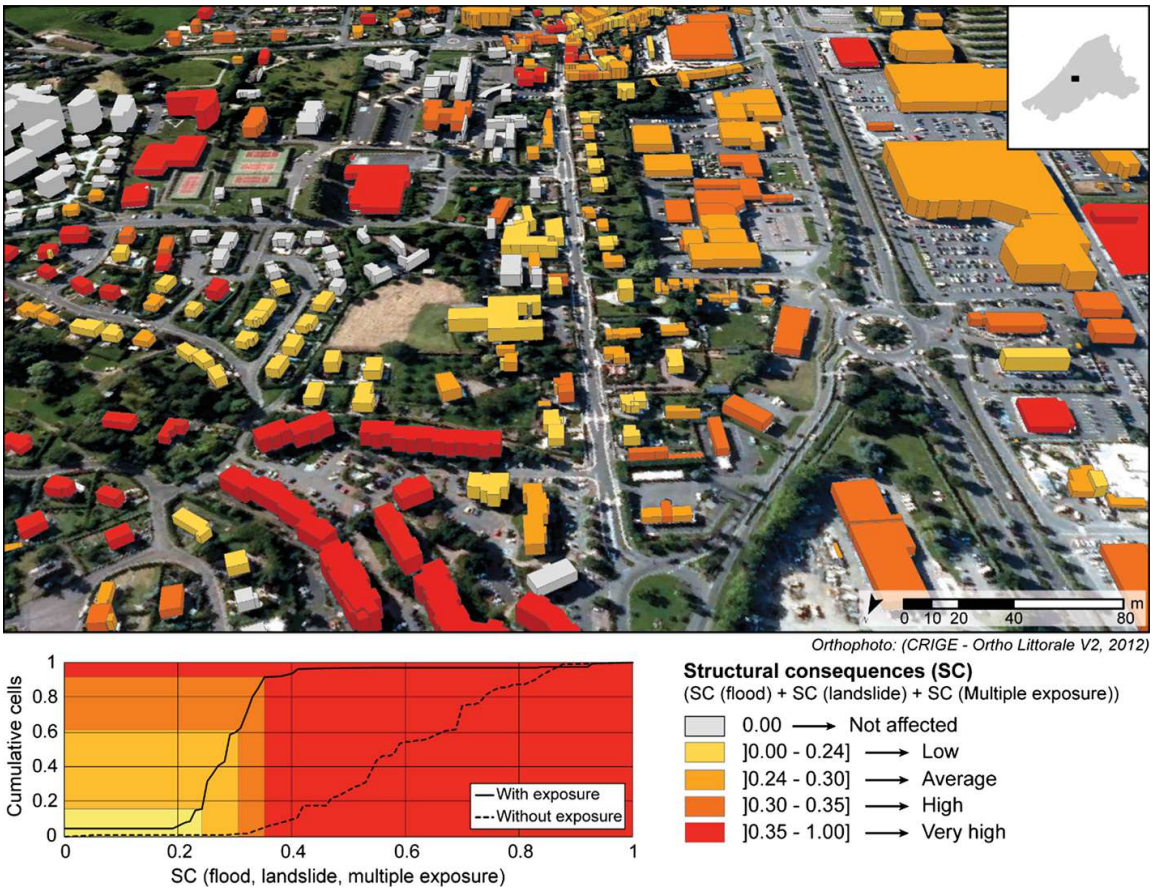


Fig. 11 Sum of structural consequences (SC) at local-scale analysis by using feature scaling method to discretized index values

Among the 861 buildings identified, 51 (5.9%) are located outside the potential exposure areas. Low consequences represent 98 buildings (11.4%) and concern houses with two floors built between 1970 and 1990 in traditional materials (good state) and located in exposed area. Average consequences represent 371 buildings (43%) and concern complexes, commercial centers and industries with two or more floors built in mixed materials (good state) after 1970. It concerns equally sheds and houses with one or two floors built in traditional or brick materials (good state) before 1970. High consequences represent 269 buildings (31%) and concern complexes, commercial centers and industries with one floor (good state) and built after 1980 in mixed materials. It concerns equally warehouses with one floor and flats with two floors built in concrete materials (good state) before 1970. Very high consequences concern any kind of buildings located on multiple exposure areas.

5 Discussion

The aim of this last section is to compare the advantages and limits of the developed method in relation to other index-oriented methodologies. Moreover, the discussion focuses on the interest to use multiple spatial scales analysis in relation to two different weighting systems (use weights index or the spatial location of EaRs to readjust the initial value). Finally, we developed the transposition keys of this method to other study sites.

5.1 Elements at risk, spatial scale analyses and weighting systems

Unlike consequences analysis, risk analysis requires a deep knowledge of hazards in terms of spatial extent, intensity and temporal occurrence (Léone et al. 1996; Muis et al. 2015; Yin et al. 2016; Van der Fels-Klerx et al. 2018). This step can be long, and an analysis of EaRs must be done in parallel. Conversely, the common potential consequences analysis can highlight the most significant EaRs but tend to disconnect the EaRs from their environment. For example, PDI method considers all EaRs that can be potentially affected by landslide exposure even in flat areas (alluvial fan or plain, etc.) without a real possible exposure (Maquaire et al. 2004; Malet et al. 2006; Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018).

The weighting systems and the use of multiple spatial scales allow the integration of environmental conditions in EaR analysis. The social dimension has been excluded from EaRs analysis because of the lack of data. Information was only available at the municipal level, requiring field interviews on communities to collect it (Carlier et al. 2018). Apart from the medium scale, the EaRs taken into consideration are close to relative vulnerability index method (Papathoma-Köhle et al. 2007; Kappes et al. 2012a; van Westen et al. 2014) and PDI method (Maquaire et al. 2004; Malet et al. 2006; Lissak et al. 2013; Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018) which focus on buildings and lifelines.

At medium-scale analysis, the whole elements are taken into consideration without considering potential exposure and first information is provided about potential hotspots considered from type of land used or land cover (Kappes et al. 2011; Cascini et al. 2013; van Westen et al. 2014). However, the information available at this scale is not sufficient to estimate precisely the type and the amount of the potential impact (physical, functional or structural) on EaRs.

This is the aim of the large-scale analysis to provide this information by focusing on buildings, transports and energy networks (Lissak et al. 2013; Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018) according to the potential exposure of EaRs. The large scale provides the first selection about what is harmful but requires an additional analysis to estimate how the EaRs (buildings) could be affected inside the potential exposure areas.

The local scale provides this information but requires field data acquisition and, therefore, cannot be implemented on large areas due to the complexity to collect this type of data (Papathoma-Köhle et al. 2007; Kappes et al. 2012b; Abbas and Routray 2013). That is why data should be filtered using specific parameters, such as exposure areas.

5.2 Ranking system, combination method and classification

The index attribution by ranking system represents the part of subjectivity in this method (Mouroux and Brun 2006; Cooke et al. 2008; Khan and Samadder 2015; Gumus et al. 2016; Van der Fels-Klerx et al. 2018). To partially overcome this part of subjectivity, a statistical distribution of EaRs has been taken into consideration (Zahran et al. 2017; Sahoo and Bhaskaran 2018). There is a need to merge statistical and expert vision in order to reflect the reality. The advantage of the ranking system is that replicability is very quick and easy and allows the comparison of EaRs on any geographical context. The main disadvantage is that ranking allocation may be controversial and cause conflicts between scientists and stakeholders (Maquaire et al. 2004; Malet et al. 2006; Papathoma-Köhle et al. 2007; Kappes et al. 2012a, b; Lissak et al. 2013; Puissant et al. 2013).

The methods combination strongly influences the results achieved. This method is foreseen for multiple contexts (scientist, operational, etc.), and consequently, the execution of the combination of various criteria must be easy to do. This is the reason why the fuzzy logic and artificial intelligence methods (neuronal networks) have been excluded since they require a long coding stage (Tayyebi et al. 2011; Lai et al. 2015) and a long process of defuzzification. Therefore, a linear combination method has been chosen because it is very easy and quick to apply.

After the combination and the weighting steps, the objective is to standardize the results to obtain a global index value between 0 and 1. Then, value thresholds must be defined to classify each type of consequences. For this purpose, the relative cumulative frequency method has been used (Saha et al. 2005; Çetinkaya et al. 2015). With this method, it is possible to adapt manually the threshold value of each class of consequences to reflect expert judgment and integrate different vision (such as end users) of the territory. Thus, the operator can define threshold value for each type of consequences.

5.3 Replicability of the method

The time-consuming part of this method is the adaptation and the updating of the various geographical databases on the study site and their combination in a final data warehouse (Ponniah 2001; Saint-Martin et al. 2018). Consequently, it is easier to apply this method for a study site which is well supplied in geographical databases. The growing development of collaborative and free geographical databases such as *Open Street Map*® allows the application of this method in various parts of the world, knowing quality of information will vary according to parts of the world (Haklay 2010; Jokar Arsanjani et al. 2015; Fonte et al. 2017).

The attribution of index value to each class of criteria also depends on the specificities of the studied area. Consequently, the method must be updated according to the presence/absence of specific EaRs. This value attribution must be done from review of the literature, field knowledge and if it is possible according to advices of local stakeholders in order to avoid controversies (Puissant et al. 2013; Carlier et al. 2018).

Finally, the adaptation of the method must consider different types of exposure related to the environmental specificities of the study site such as snow avalanche, earthquakes, lahar, etc., to adjust the index values of each class of criteria in order to describe EaRs at large and local spatial scale.

6 Conclusion

In conclusion, the use of multiple spatial scales provides a complete analysis of EaRs on a study site and highlights the type of consequences through integration of one or multiple criteria in an EaR. To quantify potential consequences, it is reasonable to consider the EaRs from a medium scale (1:50,000–1:25,000) to a local scale (1:10,000–1:2000). In terms of local criteria (> 1:2000), the analysis remains an operational approach (local contingency plan, insurance, etc.). Beyond medium scale (> 1:50,000), the method could be envisaged but requires harmonized databases on the whole region and the process of verification is harder and longer. The integration of environmental dimension, with exposure areas, in a weighting system provides the first solution in the process of risk and multirisk assessment. Indeed, in all cases, hazard is included in the delineated potential exposure areas.

Although the multi-criterion approach has a part of subjectivity, it remains quick and easier to apply than engineering approaches and remains more accurate than the expert approach. However, it can be controversial due to the choice of ranking assignment. That is why an important work of bibliographical is required to integrate end-user considerations in the process. The method developed in this paper could be easily transposed to other coastal study sites. This transposition must considerate new EaRs (such as nuclear plant, smokestacks, etc.) and needs to adapt the rank assigned to each class of criteria. Finally, this adaption must consider potential exposure areas with their uncertainties and consider an adaptation of databases integration.

Acknowledgements This research was supported by the COMUE Normandy University which has financed the Ph.D. grant of KG and by the ANR scientific project "RICOCHET: multi-RIsk assessment on Coastal territory in a global CHange context" funded by the French Research National Agency (ANR-16-CE03-0008).

References

Abbas HB, Routray JK (2013) A semi-quantitative risk assessment model of primary health care service interruption during flood: case study of Aroma locality, Kassala State of Sudan. Int J Disaster Risk Reduct 6:118–128. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2013.10.002

Akbas SO, Blahut J, Sterlacchini S (2009) Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. Proceedings of landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling, Strasbourg 67

Altenbach T (1995) A comparison of risk assessment techniques from qualitative to quantitative. In: ASME pressure and piping conference

Birkmann J (2006) Indicators and criteria for measuring vulnerability: theoretical bases and requirements. In: Birkmann J (ed) Measuring vulnerability to natural hazards–towards disaster resilient societies. United Nations University Press, Tokyo, pp 55–77

Birkmann J (2007) Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications. Environ Hazards 7:20–31. https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002

Birkmann J, Cardona OD, Carreño ML et al (2013) Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. Nat Hazards 67:193–211. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5

Bollin C, Hidajat R (2006) Community-based disaster risk index: pilot implementation in Indonesia. In: Birkmann J (ed) Measuring vulnerability to natural hazards—towards disaster resilient societies. UNU-Press, Tokyo, New York, Paris

Cardona OD (2005) Indicators of disaster risk and risk management— main technical report. IDB/IDEA program of indicators for disaster risk management, National University of Colombia, Manizales

Carlier B, Puissant A, Dujarric C, Arnaud-Fassetta G (2018) Upgrading of an index-oriented methodology for consequence analysis of natural hazards: application to the Upper Guil catchment (southern French Alps). Nat Hazards Earth Syst Sci 18:2221–2239. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2221-2018

Carpignano A, Golia E, Di Mauro C et al (2009) A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application. J Risk Res 12:513–534. https://doi.org/10.1080/13669870903050269

Cascini L, Peduto D, Pisciotta G et al (2013) The combination of DInSAR and facility damage data for the updating of slow-moving landslide inventory maps at medium scale. Nat Hazards Earth Syst Sci 13:1527–1549. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1527-2013

Çetinkaya EK, Alenazi MJF, Peck AM et al (2015) Multilevel resilience analysis of transportation and communication networks. Telecommun Syst 60:515–537. https://doi.org/10.1007/s11235-015-9991-y

Chang SE, Yip JZK, van Zijll de Jong SL, Chaster R, Lowcock A (2015) Using vulnerability indicators to develop resilience networks: a similarity approach. Nat Hazards 78:1827–1841. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1803-x

Chen Y, Dennis SB, Hartnett E et al (2013) FDA-iRISK—a comparative risk assessment system for evaluating and ranking food-hazard pairs: case studies on microbial hazards. J Food Prot 76:376–385. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-372

Chen L, van Westen CJ, Hussin H et al (2016) Integrating expert opinion with modelling for quantitative multi-hazard risk assessment in the Eastern Italian Alps. Geomorphology 273:150–167. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.041

Cooke RM, ElSaadany S, Huang X (2008) On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. Reliab Eng Syst Saf 93:745–756. https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.017

Corominas J, van Westen C, Frattini P, Cascini L, Malet J-P, Fotopoulou S, Catani F, Van Den Eeckhaut M, Mavrouli O, Agliardi F, Pitilakis K, Winter MG, Pastor M, Ferlisi S, Tofani V, Hervás J, Smith JT (2013) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bull Eng Geol Environ. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

Costa S (1997) Dynamique littorale et risques naturels : L'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la Baie de Seine et la Baie de Somme. Geography, Paris I

de Brito MM, Evers M (2016) Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. Nat Hazards Earth Syst Sci 16:1019–1033. https://doi.org/10.5194/nhess-16-1019-2016

de Tsuzuki MSG, Shimada M (2003) Geometric classification tests using interval arithmetic in b-rep solid modeling. J Braz Soc Mech Sci Eng 25:396–402. https://doi.org/10.1590/S1678-58782003000400012

Delahaye D (2003) Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture: analyse spatiale d'un phénomène complexe (From concentrated runoff to flash flood in silty loamy plateaux : spatial analysis of a complex phenomena). Bulletin de l'Association de géographes français 80(3):287–301

Delahaye D (2008) Modeling the watershed as a complex spatial system: a review. In: Guermond Y (ed) The modeling process in geography. ISTE, London, UK, pp 191–215. https://doi.org/10.1002/9780470611722.ch9

Dimakos XK, Aas K (2004) Integrated risk modelling. Stat Model 4:265–277

Dilley M, Chen RS, Deichmann U, Lerner-Lam AL, Arnold M (2005) Natural disaster hotspots: a global risk analysis. Disaster risk management series, World Bank, Washington, DC

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). Norois 17–30. https://doi.org/10.4000/norois.1733

Douvinet J, Planchon O, Cantat O, Delahaye D, Cador J-M (2009) Variabilité spatio-temporelle et dynamique des pluies de forte intensité à l'origine des « Crues Rapides » dans le bassin parisien (France). Climatologie 6

Douvinet J, Mallet F, Escudier A et al (2015a) La simulation comme outil d'anticipation des crues rapides dans les petits bassins versants en Seine-Maritime. Revue Internationale de Géomatique 25:99–122. https://doi.org/10.3166/RIG.25.99-122

Douvinet J, Van De Wiel MJ, Delahaye D, Cossart E (2015b) A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling. Nat Hazards 75(3):2905–2929

Eidsvig UMK, Kristensen K, Vangelsten BV (2017) Assessing the risk posed by natural hazards to infrastructures. Nat Hazards Earth Syst Sci 17:481–504. https://doi.org/10.5194/nhess-17-481-2017

Fisson C, Lemoine JP (2016) les niveaux d'eau en estuaire de seine: risque inondation et changement climatique. GIP Seine-Aval 3:35

Fisson C, Lemoine JP, Gandilhon F (2014) Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation en estuaire de Seine –Synthèse

Fonte C, Minghini M, Patriarca J et al (2017) Generating up-to-date and detailed land use and land cover maps using openstreetmap and globeland30. ISPRS Int J Geo-Inf 6:125. https://doi.org/10.3390/ijgi6040125

Franci F, Bitelli G, Mandanici E et al (2016) Satellite remote sensing and GIS-based multi-criteria analysis for flood hazard mapping. Nat Hazards 83:31–51. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2504-9

Fressard M, Thiery Y, Maquaire O (2014) Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale? Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France). Nat Hazards Earth Syst Sci 14:569–588. https://doi.org/10.5194/nhess-14-569-2014

Fressard M, Maquaire O, Thiery Y et al (2016) Multi-method characterisation of an active landslide: case study in the Pays d'Auge plateau (Normandy, France). Geomorphology 270:22–39. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.001

Fuchs S, Birkmann J, Glade T (2012) Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges. Nat Hazards 64:1969–1975. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9

Gallina V, Torresan S, Critto A et al (2016) A review of multi-risk methodologies for natural hazards: consequences and challenges for a climate change impact assessment. J Environ Manag 168:123–132. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011

Gallina V (2015) An advanced methodology for the multi-risk assessment: an application for climate change impacts in the North Adriatic case study (Italy)

Garcia-Aristizabal A, Gasparini P, Uhinga G (2015) Multi-risk assessment as a tool for decision-making. In: Pauleit S, Coly A, Fohlmeister S et al (eds) Urban vulnerability and climate change in Africa. Springer, Cham, pp 229–258

Gaspar-Escribano JM, Iturrioz T (2011) Communicating earthquake risk: mapped parameters and cartographic representation. Nat Hazards Earth Syst Sci 11:359–366. https://doi.org/10.5194/nhess-11-359-2011

Glade T, Crozier MJ (2005) Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ

Godfrey A, Ciurean RL, van Westen CJ, Kingma NC, Glade T (2015) Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach—an application in Nehoiu Valley, Romania. Int J Disaster Risk Reduct 13:229–241. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.001

Graff K, Lissak C, Thiery Y, Maquaire O, Costa S, Medjkane M, Laignel B (2019) Multi-hazards consequences in coastal context at different scale analyses (Normandy, France). Oral communication, Geophysical Research Abstracts, vol 21, EGU2019-2319, Session NH9.11

Gumus S, Egilmez G, Kucukvar M, Shin Park Y (2016) Integrating expert weighting and multi-criteria decision making into eco-efficiency analysis: the case of US manufacturing. J Oper Res Soc 67:616–628. https://doi.org/10.1057/jors.2015.88

Haklay M (2010) How good is volunteered geographical information? a comparative study of OpenStreetMap and ordnance survey datasets. Environ Plan B: Plann Des 37(4):682–703

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013) Changements climatiques 2013 (Les éléments scientifiques), Résumé pour les décideurs

Jeffers JM (2013) Integrating vulnerability analysis and risk assessment in flood loss mitigation: An evaluation of barriers and challenges based on evidence from Ireland. Appl Geogr 37:44–51

Jokar Arsanjani J, Mooney P, Zipf A, Schauss A (2015) Quality assessment of the contributed land use information from openstreetmap versus authoritative datasets. In: Jokar Arsanjani J, Zipf A, Mooney P, Helbich M (eds) Openstreetmap in giscience. Springer, Cham, pp 37–58

Kappes MS, Malet J-P, Remaître A et al (2011) Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. Nat Hazards Earth Syst Sci 11:627–641. https://doi.org/10.5194/nhess-11-627-2011

Kappes MS, Keiler M, von Elverfeldt K, Glade T (2012a) Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. Nat Hazards 64:1925–1958. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2

Kappes MS, Papathoma-Köhle M, Keiler M (2012b) Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. Appl Geogr 32:577–590. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002

Khan D, Samadder SR (2015) A simplified multi-criteria evaluation model for landfill site ranking and selection based on ahp and gis. J Environ Eng Landsc Manag 23:267–278. https://doi.org/10.3846/16486897.2015.1056741

Kubal C, Haase D, Meyer V, Scheuer S (2009) Integrated urban flood risk assessment—adapting a multicriteria approach to a city. Nat Hazards Earth Syst Sci 9:1881–1895

Lai C, Chen X, Chen X et al (2015) A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory. Nat Hazards 77:1243–1259. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1645-6

Laignel B, Costa S, Lequien A et al (2008) Current inputs of continental sediment to the English Channel and its beaches: a case study of the cliffs and littoral rivers of the Western Paris Basin. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues 52:21–39. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2008/0052S3-0021

Léone F, Asté J-P, Leroi E (1996) L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains: pour une meilleure quantification du risque/The evaluation of vulnerability to mass movements: towards a better quantification of landslide risks. Revue de géographie alpine 84:35–46. https://doi.org/10.3406/rga.1996.3846

Letortu P, Costa S, Bensaid A et al (2014) Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France): méthodologie et variabilité du recul. Géomorphologie: relief, processus, environnement 20:133–144. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10588

Li C, Cheng X, Li N, Du X, Yu Q, Kan G (2016) A framework for flood risk analysis and benefit assessment of flood control measures in urban areas. Int J Environ Res Publ Health 13(8):787

Lissak C, Maquaire O, Puissant A, Malet J-P (2013) Landslide consequences and post crisis management along the coastal slopes of Normandy, France. In: Margottini C, Canuti P, Sassa K (eds) Landslide science and practice. Springer, Berlin, pp 23–30

Lissak C, Maquaire O, Malet J-P et al (2014) Airborne and ground-based data sources for characterizing the morpho-structure of a coastal landslide. Geomorphology 217:140–151. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.019

Liu Z, Nadim F, Garcia-Aristizabal A et al (2015) A three-level framework for multi-risk assessment. Georisk Assess Manag Risk Eng Syst Geohazards 9:59–74. https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1041989

Malet J-P, Thiery Y, Maquaire O, Puissant A (2006) Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque glissement de terrain. Revue Internationale de Géomatique 16:499–525

Maquaire O (1990) Les mouvements de terrain de la côte du calvados recherche et prévention. BRGM, Orléans

Maquaire O, Weber C, Thiery Y, et al (2004) Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins. Identification of exposed elements with a semi-automatic procedure. In: Proceedings of 9th international symposium on landslides. Balkema, Rio de Janeiro, Brazil, pp 171–176

Marzocchi W, Garcia-Aristizabal A, Gasparini P et al (2012) Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. Nat Hazards 62:551–573. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x

MEEM/MLHD (2016) Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR), Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (MEEM), Ministère du Logement et de l'Habitat Durable (MLHD). La Documentation Française

Milanesi L, Pilotti M, Belleri A et al (2018) Vulnerability to flash floods: a simplified structural model for masonry buildings. Water Resour Res 54:7177–7197. https://doi.org/10.1029/2018WR022577

Mouroux P, Brun BL (2006) Presentation of RISK-UE Project. Bull Earthq Eng 4:323–339. https://doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3

Muis S, Güneralp B, Jongman B et al (2015) Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: a probabilistic analysis using global data. Sci Total Environ 538:445–457. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.068

Nezarat H, Sereshki F, Ataei M (2015) Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). Tunn Undergr Space Technol 50:358–364. https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.07.019

Papathoma-Köhle M, Neuhäuser B, Ratzinger K et al (2007) Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. Nat Hazards Earth Syst Sci 7:765–779

Papathoma-Köhle M, Gems B, Sturm M, Fuchs S (2017) Matrices, curves and indicators: a review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. Earth Sci Rev 171:272–288. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.007

Penadés-Plà V, García-Segura T, Martí J, Yepes V (2016) A review of multi-criteria decision-making methods applied to the sustainable bridge design. Sustainability 8:1295. https://doi.org/10.3390/su8121295

Petrucci O, Gullà G (2010) A simplified method for assessing landslide damage indices. Nat Hazards 52:539–560. https://doi.org/10.1007/s11069-009-9398-8

Planton S, Le Cozannet G, Cazenave A, Costa S, Douez O, Gaufrès P, Hissel F, Idier D, Laborie V, Petit V, Sergent P (2015) Le climat de la France au XXIe siècle - Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Vol. 5 (Action 1 du Plan national d'adaptation au changement climatique-MEEM),. Sous la direction de J. Jouzel, CEA - LSCE/IPSL

Ponniah P (2001) Data warehousing fundamentals: a comprehensive guide for IT professionals. Wiley, New York

Puissant A, Van Den Eeckhaut M, Malet J-P, Maquaire O (2013) Landslide consequence analysis: a region-scale indicator-based methodology. Landslides 11:843–858. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0429-x

Saaty TL (2006) Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. Eur J Oper Res 168:557–570. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.032

Saha AK, Gupta RP, Sarkar I et al (2005) An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation? With a case study in the Himalayas. Landslides 2:61–69. https://doi.org/10.1007/s10346-004-0039-8

Sahoo B, Bhaskaran PK (2018) Multi-hazard risk assessment of coastal vulnerability from tropical cyclones—a GIS based approach for the Odisha coast. J Environ Manag 206:1166–1178. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.075

Saint-Martin C, Javelle P, Vinet F (2018) DamaGIS: a multisource geodatabase for collection of flood-related damage data. Earth Syst Sci Data 10:1019–1029. https://doi.org/10.5194/essd-10-1019-2018

Scheuer S, Haase D, Meyer V (2011) Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: from a starting point

view towards an end point view of vulnerability. Nat Hazards 58:731–751. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9666-7
Tayyebi A, Pijanowski BC, Tayyebi AH (2011) An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: an application to Tehran, Iran. Landsc Urban Plan 100:35–44. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.007
Totschnig R, Sedlacek W, Fuchs S (2011) A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. Nat Hazards 58(2):681–703
Turki I, Laignel B, Chevalier L et al (2015) On the investigation of the sea-level variability in coastal zones using SWOT satellite mission: example of the Eastern English Channel (Western France). IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens 8:1564–1569. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2419693
Uzielli M, Catani F, Tofani V, Casagli N (2015) Risk analysis for the Ancona landslide—II: estimation of risk to buildings. Landslides 12(1):83–100
Van der Fels-Klerx HJ, Van Asselt ED, Raley M et al (2018) Critical review of methods for risk ranking of food-related hazards, based on risks for human health. Crit Rev Food Sci Nutr 58:178–193. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1141165
Van Westen CJ (2000) The modelling of landslide hazards using GIS. Surv Geophys 21:241–255
van Westen CJ, Castellanos E, Kuriakose SL (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. Eng Geol 102:112–131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010
van Westen C, Kappes MS, Luna BQ et al (2014) Medium-scale multi-hazard risk assessment of gravitational processes. In: Van Asch T, Corominas J, Greiving S et al (eds) mountain risks: from prediction to management and governance. Springer, Netherlands, pp 201–231
Vojinovic Z, Hammond M, Golub D et al (2016) Holistic approach to flood risk assessment in areas with cultural heritage: a practical application in Ayutthaya, Thailand. Nat Hazards 81:589–616. https://doi.org/10.1007/s11069-015-2098-7
Wei S-H, Chen S-M (2009) Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers. Expert Syst Appl 36:2285–2299. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.12.037
Yin J, Yu D, Yin Z et al (2016) Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: a case study in the city center of Shanghai, China. J Hydrol 537:138–145. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.037
Yoon E, Lee D, Kim H et al (2017) Multi-objective land-use allocation considering landslide risk under climate change: case study in Pyeongchang-gun, Korea. Sustainability 9:2306. https://doi.org/10.3390/su9122306
Zahran S, Brody SD, Peacock WG et al (2008) Social vulnerability and the natural and built environment: a model of flood casualties in Texas. Disasters 32:537–560. https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2008.01054.x
Zahran E-SMM, Tan SJ, Yap YH et al (2017) A novel approach for identification and ranking of road traffic accident hotspots. MATEC Web Conf 124:04003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201712404003

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Affiliations

K. Graff[1,2] · C. Lissak[1] · Y. Thiery[3] · O. Maquaire[1] · S. Costa[1] · B. Laignel[2]

C. Lissak
candide.lissak@unicaen.fr

Y. Thiery
Y.Thiery@brgm.fr

O. Maquaire
olivier.maquaire@unicaen.fr

S. Costa
stephane.costa@unicaen.fr

B. Laignel
benoit.laignel@univ-rouen.fr

[1] Normandie Univ, Unicaen, CNRS, LETG-Caen, 14000 Caen, France

[2] Normandie Univ, Unirouen, CNRS, M2C-Rouen, 76000 Rouen, France

[3] BRGM (French Geological Survey) Risk and Prevention Division, 45060 Orléans, France

Applied Geography 111 (2019) 102076

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Geography

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apgeog

Characterization of elements at risk in the multirisk coastal context and at different spatial scales: Multi-database integration (normandy, France).

K. Graff[a,b,*], C. Lissak[a], Y. Thiery[c], O. Maquaire[a], S. Costa[a], M. Medjkane[a], B. Laignel[b]

[a] NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000, Caen, France
[b] NORMANDIE UNIV, UNIROUEN, CNRS, M2C, 76000, Rouen, France
[c] BRGM (French Geological Survey) Risk and Prevention Division, 45100, Orléans, France

ARTICLE INFO

Keywords:
Element at risk
Multi-criteria
Integration model
Multi-scales
Multirisk

ABSTRACT

In risk analyses, two components are taken into account: (1) hazard analysis, including susceptibility and temporal occurrence, and (2) consequence analysis, including characterization of elements at risk (EaRs) and their vulnerability. This study focused on characterization of EaRs, in which items are spatially displayed and impacted by natural events. Several methods can assess these EaRs through expert or engineering approaches. Among the expert approaches, the multicriteria method is more flexible and allows integration of a wide range of information in order to characterize and discretize different EaRs. Traditionally, the mapping and criteria accuracy of EaRs is the same at all spatial analysis scales, while the hazard accuracy changes according to the spatial scales. Therefore, we propose an approach based on the selection of different information/criteria among several private or open access multiple geographical databases to adapt the mapping and criteria accuracy of each EaR according to the hazard analysis spatial scale. After harmonizing the different databases and merging them under GIS, a single database per work scale is created through a specific procedure with interoperability of results between scales. Thus, the number of criteria used to describe these EaRs will depend on the scale of work and the spatial scale of the analysis. To develop and test the transposability of this method, three experimental coastal study sites subject to several hazards (multirisk) have been selected in Normandy (France) with error estimations ranging between 10% and 20%. Subsequently, these data can be integrated into risk and multirisk analyses.

1. Introduction

In coastal environments, the interaction between nature and societies is particularly high. For sustainable management of societies, risk and more specifically multirisk analyses are carried out and regularly updated due to global change (climate change and land use evolution). Risk analysis is a combination of hazard and consequence assessments, whereas multirisk analysis is a combination of several risks. Consequences are the result of an exposed element, called an element at risk (EaR) by the scientific community, and its vulnerability to a hazard. In this study, we focus specifically on characterization of EaRs that refer to physical injuries or structural or functional impacts that can be spatially displayed (Birkmann et al., 2013; Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 2014; Cutter et al., 2008; Timmerman, 1981; UNISDR, 2017). Usually, EaRs are only considered inside hazard areas. However, potential overextension due to uncertainties in the evolution process require consideration of EaRs outside current hazards areas (Gallina et al., 2016; Papathoma-Köhle, Neuhäuser, Ratzinger, Wenzel, & Dominey-Howes, 2007).

Two main approach are commonly used to assess EaRs in a territory: engineering and expert approaches. Different engineering approaches are available, including curve vulnerability analysis, which provides precise descriptions and absolute values of the loss and potential damage depending on the hazard (Li et al., 2016; van Westen, Castellanos, & Kuriakose, 2008). However, these methods involve a huge amount of data that leads to an in-depth analysis that cannot be replicated everywhere (Petrucci & Gullà, 2010). Among the expert approaches, methods such as ranking systems are commonly used in French document planning due to their swift implementation potential and low data requirements (Malet, Thiery, Maquaire, & Puissant, 2006; MATE/

* Corresponding author. NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000, Caen, France.
E-mail addresses: kevin.graff@unicaen.fr (K. Graff), candide.lissak@unicaen.fr (C. Lissak), y.thiery@brgm.fr (Y. Thiery), olivier.maquaire@unicaen.fr (O. Maquaire), stephane.costa@unicaen.fr (S. Costa), mohand.medjkane@unicaen.fr (M. Medjkane), benoit.laignel@univ-rouen.fr (B. Laignel).

https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102076
Received 14 December 2018; Received in revised form 20 August 2019; Accepted 27 August 2019
Available online 02 September 2019
0143-6228/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

METL, 2016). However, the subjectivity in the choice of variables induces difficult comparisons of the results (Kappes et al., 2012). Consequently, a multicriteria method has been developed to reduce the uncertainties involved in the use of ranking methods (Malet et al., 2006; Puissant, Van Den Eeckhaut, Malet, & Maquaire, 2013). This method consists of assessment using criteria and a weighting system(s) index (Carlier, Puissant, Dujarric, & Arnaud-Fassetta, 2017; Puissant et al., 2013). The main advantage of this method is its flexibility, which allows adaptation to the number of criteria and databases used to describe EaRs (Carlier et al., 2017; Puissant et al., 2013; Reghezza-Zitt & Rufat, 2016). However, the number of criteria used and their spatial accuracies must be consistent with the spatial scale analysis.

Based on this multicriteria method (expert approach), two main objectives are highlighted to enhance EaR analysis using multiple scale analysis methods and geographical databases.

The first objective is to propose consistent accuracy of EaRs in terms of mapping and criteria integration according to the spatial scale analysis. The following scales are drawn from scales used in hazard analyses (Van Westen, 2000; van Westen et al., 2008): (1) small-scale analysis (Carpignano, Golia, Di Mauro, Bouchon, & Nordvik, 2009) in the range of 1:100,000–1:250,000, which is used by regional collectives for strategic planning (MATE/METL, 2016), (2) medium-scale analysis in the range of 1:25,000–1:50,000, which is preferred for identification of critical facilities (Kappes et al., 2011; van Westen et al., 2014), (3) large-scale analysis (1:10,000–1:25,000), which is used for characterization of infrastructures, such as buildings or networks (Carlier et al., 2017; Puissant et al., 2013), and (4) local-scale analysis (1:2000–1:10,000), which provides more detailed information about the structural components of infrastructures, such as building materials and the date of construction (Chen et al., 2016; Kappes et al., 2012). In this study, we consider scales ranging from medium to local-scale analysis. Beyond the medium scale, EaRs are not considered accurate. From these different scale analyses, we used multiple geographical databases (GDBs) to characterize criteria and describe EaRs.

The second objective concerns the acquisition and harmonization of multiple databases to assess EaRs and their criteria with a coherent degree of detail. The mapping accuracy and criteria integrated to describe these EaRs depend of\n the spatial analysis scale (see above). At the global scale, the use of remote sensing is privileged; however, at the medium to large scale, the use of GDBs must prevail. Three types of GDBs are identified: (1) GDBs provided by institutions under conditions, (2) GDBs originating from volunteered geographical information (VGI), which is an open data format, and (3) archive documents available under conditions that require digitalization (Bol, Grus, & Laakso, 2016; Foody et al., 2015; Olteanu-Raimond et al., 2017). At the local scale, these databases are merged with field data acquisition or photointerpretation (Papathoma-Köhle et al., 2007; Lissak, 2012; Puissant et al., 2013; Hénaff & Philippe, 2014). Difficulties associated with these different databases are related to harmonization and verification of these data and their integration into data warehouses.

Consequently, the main challenge is defining EaRs and their criteria at different analysis scales using multiple GDBs. Multiple EaR scale descriptions and characterization are lacking in risk analyses. These terms have been defined at only one analysis scale and then zoomed in (or vice versa), and thus the accuracy of the EaRs is the same at a local or watershed scale. Furthermore, various EaRs that are incomparable are taken into account in the same analysis, such as biological areas and building functions. The development of GDBs has allowed identification of different EaRs at different scales, but different datasets must be merged to obtain adequate accuracy after verifying their reliability. The use of multiple GDBs will provide a better assessment of EaRs at the medium and large scales. At the local scale, field data acquisition is leading to identification of the intrinsic characteristics of buildings. Thus, the accuracy (spatial and attribute) varies according to the analysis scale.

In the first part of this paper, we perform a bibliographical synthesis to identify EaRs and the criteria used in different risk analysis contexts. In second part, based on this synthesis, we define a set of criteria to characterize EaRs at each spatial analysis scale. In the third part, two data integration models are calibrated for EaR assessment at medium and large scales and from the use of multiple GDBs. Then, these models are validated by field observation. In the fourth part, transposition models are performed at two other study sites in the same region. The fifth part shows the integration model results and discusses the adaptability of the models to other study sites and the possibility of updating the results obtained at different scales.

2. Methods

The proposed method consists of the following steps: (1) a review to define a different set of criteria according to different hazard and risk analyses, (2) the attribution of criteria for each of the three scale analyses according to the review, (3) an inventory of existing GDBs, which is necessary for the establishment of these criteria, and finally (4) creation of two integration models.

2.1. Towards a review to define EaRs for different hazard categories

To propose consistent criteria for a multistage EaR assessment and different types of risk, existing methods must be reviewed. In our case, three types of risks are taken into consideration: (1) flood risk analysis involving marine and continental flooding, (2) landslide risk analysis involving continental and coastal landslide hazards, and (3) multi-hazard risk analysis involving concomitance and cascade effects according to current hazards at the three study sites. In our study area, other hazards, such as collapse or seismicity, are less significant in terms of damage than hydro-gravitational hazards. At least three or more multicriteria methods were developed for single hazard analysis with corresponding analysis scales ranging from 1:50,000 (medium scale) to 1:2000 (local scale). Thirteen methods were reviewed, representing 21 authors (Table 1).

Of the five different flood analysis methods (eight authors) and fifteen identified criteria, nine involved building analyses. Among these criteria, the most important is related to the functions (Kubal, Haase, Meyer, & Scheuer, 2009; Meyer, Haase, & Scheuer, 2009a, b; Scheuer, Haase, & Meyer, 2011; Vojinovic et al., 2016) and the number of floors (Eckert, Jelinek, Zeug, & Krausmann, 2012; Hénaff & Philippe, 2014). The secondary criteria used are the type of urbanized area (*i.e.,* urban centre, residential area, etc.) and the type of natural surface (Camarasa Belmonte, López-García, & Soriano-García, 2011; Meyer et al., 2009a, b; Kubal et al., 2009; Scheuer et al., 2011).

Considering five different landslide risk analysis methods (Table 1), fifteen criteria were identified to characterize the EaRs. Among them, nine focused on building analysis to define their functions, including the number of floors, construction materials and age (Bianchini et al., 2017; Carlier et al., 2017; Lissak, 2012; Maquaire et al., 2004; Papathoma-Köhle et al., 2007; Puissant et al., 2013; Uzielli et al., 2015). Similar to flood risk analyses, other common criteria used include the urbanization type and agricultural and natural surfaces (Bianchini et al., 2017; Cascini et al., 2013).

For the multi-hazard analysis, three different methods (Table 1) considered nine criteria to characterize the EaRs. Among them, eight criteria concerned building analyses to define their functions, including the number of people, number of floors and surroundings (Chen et al., 2016; Godfrey et al., 2015; Kappes et al., 2012; van Westen et al., 2014). The EaRs and criteria for all of these methods are described in Fig. 1.

The cross-analysis of twenty-one identified criteria (floods, landslides and multi-hazards) highlights buildings as the most important component, representing 60% of the total number of criteria.

Among the 13 methods, the criteria most commonly used to characterize buildings are as follows:

Table 1
Criteria used for different risk analyses with multi-criteria methods from the 1:2000 to 1:50,000 scales.

Method	Criteria used	Attributes	Scenario	Country	Source
(1.1) Flood	Population (residential)	Low, large, high density	Working day (8–20 h)	Spain (Valencia)	Camarasa Blaikie, Cannon, Davis, and Wisner (2014)
	Urbanized area (type)	Administration, cemetery, etc.	Night time (20-8 h)		
	Agricultural (type)	Arable, citrus tree, etc.	Holidays (8–20 h)		
	Natural surface (type)	Forestry, pasture, lagoon, etc.			
(1.2) Flood (FloodCalc Urban)	Transport (function)	Streets, rails	50 Y-flood	Germany (Leipzig)	Kubal et al. (2009); Meyer et al. (2009a, b); Scheuer et al. (2011)
	Building (function)	Residential, commercial, etc.	100 Y-flood		
	Urbanized area (type)	Fairground, sport, etc.	200 Y-flood		
	Building (value)	Land value per floor space			
	Population (residential)	Pop. per building (children, etc.)			
	Population (building)	School, hospital, kindergartens, etc.			
	Natural surface (type)	Forest, contaminated sites, etc.			
(1.3) Flood	Building (floors)	1, 2, [3–4], etc.	5 m sea waves	Egypt (Alexandria)	Eckert et al. (2012)
	Building (material)	Concrete, traditional, mortar, etc.	9 m sea waves		
	Building (environment)	Shoreline distance			
(1.4) Flood (V.I.E.)	Building (environment)	Water depth, distance to refuge, etc.	None	France (Pays de la Loire)	Hénaff and Philippe (2014)
	Building (floors)	1 floor without windows or roof, etc.			
(1.5) Flood	Building (type)	Pillar house, two-story house, etc.	Activity during event	Thailand (Ayuthaya)	Vojinovic et al. (2016)
	Building (function)	Hospital, police station, etc.	Activity after event		
	Transport (material)	Asphalt roads, gravel roads, etc.			

Method	Criteria used	Attributes	Scenario	Country	Source
(2.1) Landslide (Potential Damage Index)	Building (type)	Housing, tourism activity, cemetery, etc.	Summer period	France (Alpes)	Maquaire, Weber, Thiery, Puissant, and Malet (2004); Puissant et al. (2013); Lissak (2012); Puissant et al. (2013); Carlier et al. (2017)
	Building (function)	Education, emergency, trade, etc.	Winter period		
	Building (floors)	> 6, 3–6, < 3, etc.			
	Building (state)	Good, moderate, etc.			
	Building (material)	Concrete, traditional, etc.			
	Building (age)	> 1900, 1970–1990, etc.			
	Population (residential)	0, < 3, [3–6], etc.			
	Transport (function)	Strategic road, servicing road, etc.			
	Lifelines (type)	Energy lines and power stations			
	Urbanized area (type)	Cemetery, camping, etc.			
	Agricultural (type)	Pasture and cropland			
	Natural surface (type)	Forest, grass, water, etc.			

(*continued on next page*)

Table 1 (*continued*)

Method	Criteria used	Attributes	Scenario	Country	Source
(2.2) Landslide	Building (function)	Education, emergency, trade, etc.	Summer period	Germany (Swabian Alb)	Papathoma-Köhle et al. (2007)
	Building (material)	Concrete, traditional, etc.	Winter period		
	Building (age)	> 1900, 1970–1990, etc.	Day time (8–20 h)		
	Building (surrounding)	Without walls, stone walls, etc.	Night time (20-8 h)		
	Building (floors)	> 6, 3–6, < 3, etc.			
	Transport (function)	Strategic road, servicing road, etc.			
	Lifelines (type)	Energy lines and power stations			
	Urbanized area (type)	Cemetery, camping, etc.			
	Agricultural (type)	Pasture and cropland			
	Natural surface (type)	Forest, grass, water, etc.			
(2.3) Landslide	Building (state)	With (or less) damage	None	Italy (Volturno)	Cascini et al. (2013)
	Road (state)	With (or less) damage			
	Urbanized area (type)	Historical centre, residential area, etc.			
(2.4) Landslide	Building (material)	Stone masonry, concrete, etc.	None	Italy (Ancona)	Uzielli, Catani, Tofani, and Casagli (2015)
	Building (surrounding)	Without walls, stone walls, etc.			
	Building (floors)	> 6, [3–6], < 3, etc.			
	Building (age)	> 1900, 1970–1990, etc.			
	Building (foundation)	Plinths, strip footing, etc.			
(2.5) Landslide	Building (function)	Administration, industrial, etc.	None	Italy (Volterra)	Bianchini, Solari, and Casagli (2017)
	Urbanized area (type)	Campground and touristic complex			
	Agricultural (type)	Croplands, vineyards, etc.			
	Natural surface (type)	Grassland, wood, etc.			
	Transport (function)	State highway, toll road, etc.			
(3.1) Multi-hazard (Relative Vulnerability Index)	Building (material)	Stone masonry, concrete, etc.	Day (summer/winter)	France (Barcelonnette)	Kappes, Keiler, et al. (2012) and Kappes, Papathoma-Köhle, et al. (2012); van Westen et al. (2014)
	Building (floors)	> 6, [3–6], < 3, etc.	Night (summer/winter)		
	Building (surrounding)	Without walls, stone walls, etc.	Earthquake		
	Building (warning signal)	Presence (or absence) of warning signal	Landslide		
	Population (residential)	Pop. per building (children, elder, etc.)	Flood		
	Population (vulnerable)	Hospital, schools, etc.	Storm		
(3.2) Multi-hazard	Building (floors)	> 6, [3–6], < 3, etc.	River floods	Romania (Nehoiu Valley)	Godfrey, Ciurean, van Westen, Kingma, and Glade (2015)
	Building (surrounding)	Openings towards slope, slope, etc.	Flash floods		
	Building (material)	Cracks in structure, maintenance, etc.	Slow moving landslide		
	Building (foundation)	Plinths, strip footing, etc.	Debris flows		
(3.3) Multi-hazard	Building (function)	Commercial, residential, factory, etc.	River floods	Italy (Fella river valley)	Chen et al. (2016)
	Building (material)	Brick, concrete, masonry, etc.	Debris flows		
	Building (value)	[750–5.000 €], [5000–10.000 €], etc.	Flash floods		
	Population (tourism)	[1–2 people per building], etc.	Major to frequent event		
	Urbanized area (type)	Place of worship, recreational, etc.			

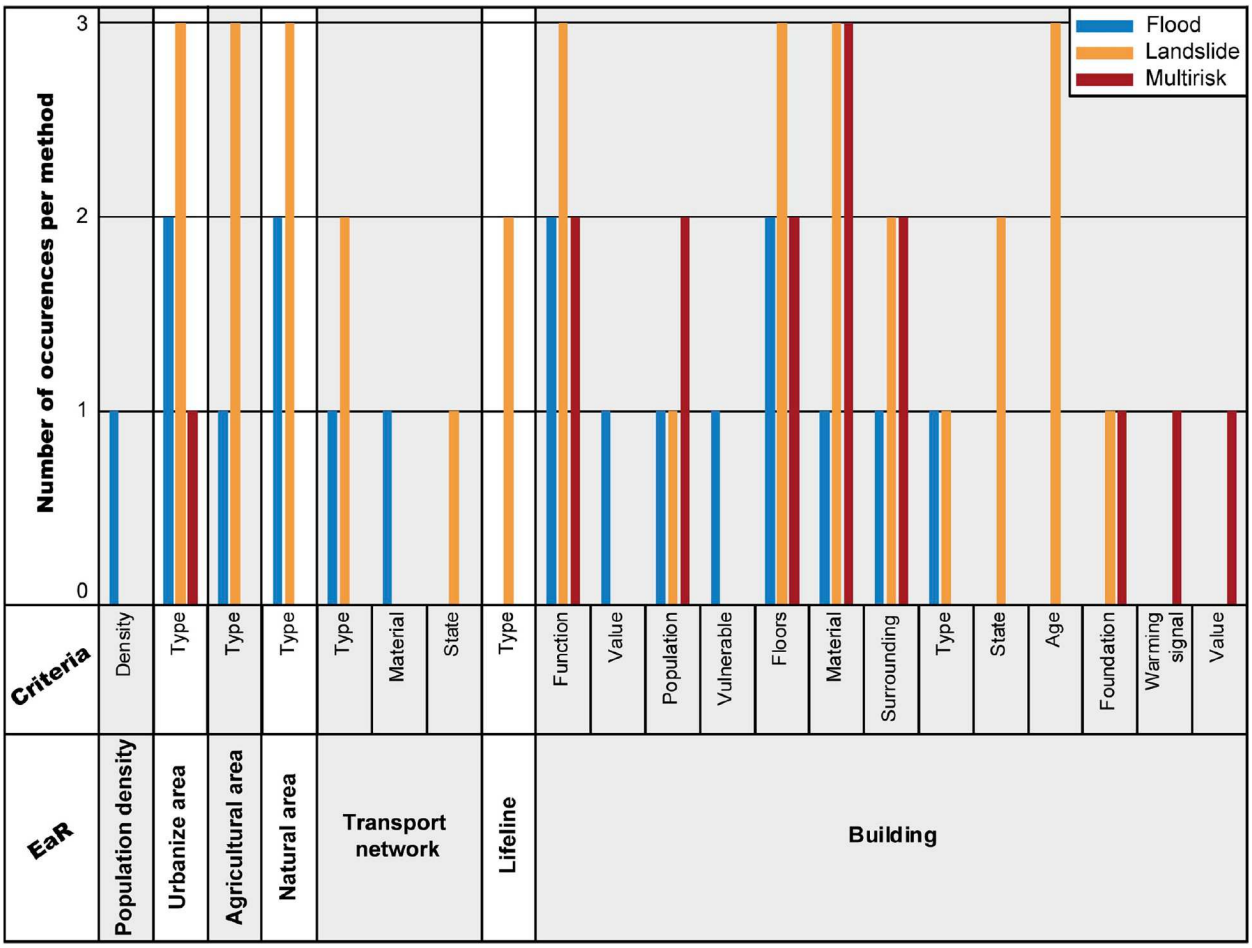


Fig. 1. Synthesis of the identified EaRs and the criteria used for the 13 multi-criteria methods (expert approach) based on three hazard types: flood, landslide and multi-hazard.

- the function within the study site (economic, administrative, cultural, etc.) (7 occurrences);
- the number of floors (7 occurrences);
- the construction materials (5 occurrences); and
- the surroundings (5 occurrences).

The secondary criteria taken into account are as follows:

- the type of urbanized areas (7 occurrences) and
- the natural surfaces (6 occurrences).

The third criteria taken into consideration are as follows:

- the type of agricultural surfaces (4 occurrences);
- the number of people by building (4 occurrences); and
- the type of transport network (3 occurrences).

Criteria with fewer than two occurrences are considered non-representative components, such as the transport network material (Vojinovic et al., 2016) or building foundation type (Godfrey et al., 2015).

For each paper analysed, two patterns are noticeable in the choice of different criteria. For the first pattern, authors take all components of the territory into consideration, including natural surfaces, network transport and buildings (Bianchini et al., 2017; Carlier et al., 2017; Puissant et al., 2013). The weighting of criteria places the EaRs considered non-significant in the background with low weights. For the second identified pattern, the authors focus on only a few elements in the territory, such as buildings with different descriptions (Chen et al., 2016; Godfrey et al., 2015; Kappes et al., 2012; van Westen et al., 2014). This approach allows analysis of different criteria with the same importance in the index weight. However, it prevents taking into account the different constraints present at the study site. The method proposed in this paper takes into account these two different approaches according to the scale analysis.

2.2. Set of criteria adapted for multi-scale analyses

Hazard analysis is well established in the literature and planning documents and operates through multiple spatial scales ranging from global to local. Thus, hazard mapping of the gain of accuracy and more details are integrated according to the spatial scale. However, in traditional EaR studies in which only one scale is considered, the spatial accuracy is the same at each scale (simply zoomed in or vice versa) (Table 1). Consequently, the EaR details are the same at each spatial scale. In this context, the aim is to provide different sets of criteria to describe EaRs according to various scale analyses with a goal of improving EaR assessment methods.

Van Westen, Van Asch, and Soeters (2006, 2008) defined a four-scale analysis for risk assessment from small (greater than 1:50,000) to local (less than 1:10,000) scales. In the small-scale analysis, the accuracy is not sufficient to define the EaRs and distinguish the various components of the territories. Consequently, this analysis scale is not considered in this paper.

In the medium-scale analysis (from 1:50,000 to 1:25,000) (Fig. 2a), the aim is to provide spatial information about all components and

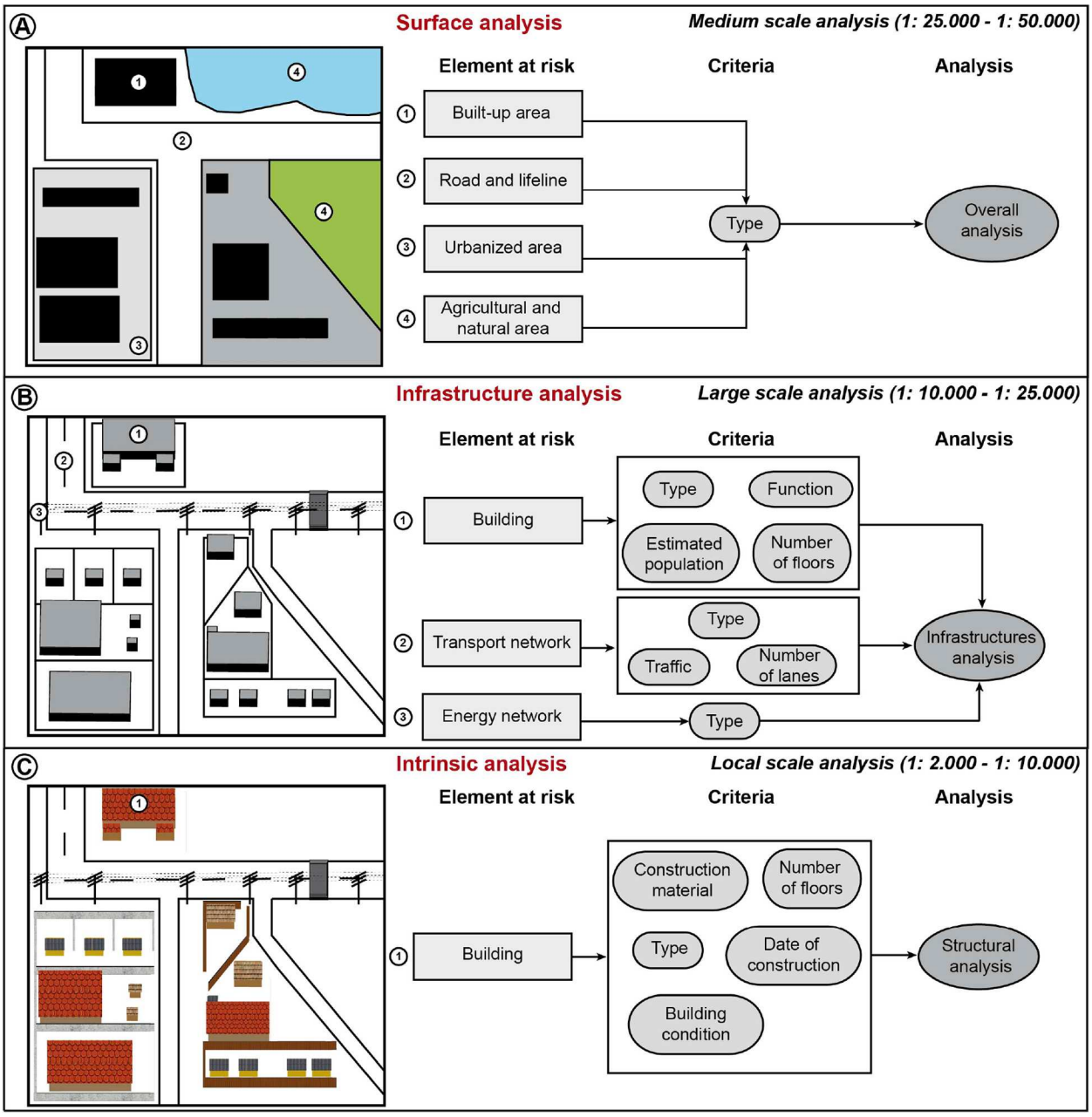


Fig. 2. Spatial and attribute accuracies of EaRs at three analysis scales with the same spatial extent.

constraints of the study sites (overall analysis), such as protected areas or agricultural surfaces. This scale analysis must provide global information about the main components of the territories, critical facilities, future development of the territory or the main resources available in the area (Armaş, Ionescu, Gavriş, & Toma-Danila, 2016; Dilley, Chen, Deichmann, Lerner-Lam, & Arnold, 2005). The use of one criterion to characterize different EaRs in the territory (1. built-up area, 2. roads and lifelines, 3. urbanized area and 4. agricultural and natural surfaces) allows all EaRs to be pooled within the same analysis.

The purpose of the large-scale analysis (from 1:25,000 to 1:10,000) (Fig. 2b) is to identify physical injury and structural and functional impacts of infrastructure components (Carlier et al., 2017; Lissak, Maquaire, Puissant, & Malet, 2013; Malet et al., 2006; Maquaire et al., 2004; Puissant et al., 2013). These infrastructures are buildings and transport-energy systems. In contrast to the medium scale, the focus of this scale is to compare similar EaRs (infrastructures such as buildings, roads, etc.) and to avoid over- or underestimation.

In this context, (1) physical injuries are defined based on the estimated population by building (Chen et al., 2016; Kappes et al., 2012; Kubal et al., 2009; Scheuer et al., 2011; van Westen et al., 2014) and road traffic, (2) functional impacts are defined based on the economic function of each building and the road and lifeline type, and (3) structural impacts are defined by both the type and number of floors of each building and by the number of lanes (road, highway, etc.). Moreover, agricultural and natural areas are not taken into account at this analysis scale, because the scale cannot consider the site specificity, such as biodiversity, economic gain or loss or productivity by plot (Ernoul et al., 2018; Ženka, Slach, Krtička, & Žufan, 2016).

In the local-scale analysis (from 1:10,000 to 1:2000) (Fig. 2c), the aim is to obtain a better assessment of the structural elements related to building. The focus of this analysis scale is to provide better information about different forms of vulnerability (Kappes et al., 2012; Papathoma-Köhle, Gems, Sturm, & Fuchs, 2017). Thus, for each building, five criteria can be used to characterize the structure: (1) the construction

Table 2
Sources and data used for characterization of the EaRs in the medium-scale (M), large-scale (L) and local-scale (l) analyses.

Range	Source	Data provided	Updated	M	L	l
Global	Open Street Map (OSM)	1. Building (surface, function, type, name)	2018	●	●	●
		2. Land use (surface, type, name)	2018	●	●	●
		3. Natural area (surface, type, name)	2018	●		
		4. Place (surface, type, name)	2018	●	●	●
		5. Network (type, name)	2018	●	●	
National (France)	IGN[a] (BD TOPO®)	1. Traffic network (surface, type, name, state, etc.)	2017	●	●	
		2. Lifeline (type, tension, operating)	2017	●	●	
		3. Natural area (surface, type)	2017	●		
		4. Building (surface, height, function, type)	2017	●	●	●
		5. Land use (surface, function)	2017	●	●	
	CdL[b]	1. Protected area (surface, name)	2011	●		
		2. Land cover (type)	2011	●		
	RPG[c]	1. Agricultural plot (surface, type)	[2007–2016]	●		
	INSEE[d]	1. Tiles_200 × 200 (population)	2010		●	
	INPN[e]	1. Protected area (surface, type, name)	2017	●		
	Notary/INSEE	1. Land price (value)	2018			●
Regional	CETE[f]	1. Building (surface, date)	2011			●
	MOS Normandy[g]	1. Land use (surface, type, function)	2009	●	●	
Local	PLU/PLUi[h]	1. Land use (surface, function)	[2007–2018]	●	●	
	Field data and photointerpretation	Building (Material construction, condition)	2018			●

[a] IGN (National Geographic Institute).
[b] CdL (Coastal conservatory).
[c] RPG (Graphical Parcel Register).
[d] INSEE (French National Institute for Statistic and Economic Research).
[e] INPN (National Inventories for Cultural and Natural Heritage).
[f] CETE (Public Works Regional Engineering Centres).
[g] MOS Normandy (Normandy Land Cover).
[h] PLU/PLUi (urban planning documents).

material, (2) the number of floors, (3) the construction type, (4) the date of construction and (5) the building condition. These criteria, which are complementary to the large-scale analysis, require the acquisition of field data and should be limited to a few buildings (Lissak, 2012).

2.3. Geographical databases used in integration models

The use of multiple GDBs to identify EaRs at different scales is a recent addition to risk analyses due to the development of multiple data platforms and sources (Campelo, Bertolotto & Corcoran, 2017; Johansson, Olofsson, & Mangold, 2017; Jokar Arsanjani, Mooney, Zipf, & Schauss, 2015). These different platforms and sources represent an alternative to traditional data collection from the field or photo-interpretation (Ambrosi, Strozzi, Scapozza, & Wegmüller, 2018; Defossez, Vinet, & Leone, 2017). In this paper, multiple GDBs were integrated for the medium- and large-scale analyses, and local-scale field data were promoted.

Three types of GDBs are available for open access or under conditions (Table 2). The GDBs produced by national institutes are regularly updated and controlled. Consequently, confidence in these GDBs is particularly high.

The second type of GDB comes from (2) VGI (Bol et al., 2016; Foody et al., 2015; Olteanu-Raimond et al., 2017), which is an open data format, such as *Open Street Map* (OSM). Multiple associations or users supply the GDBs produced by this institution. These GDBs are updated in near real-time but require an audit before integration with other GDB types.

The third type of GDB comes from archive documents available in municipalities, such as the *Local Urbanism Plan* (PLU) or the *Intercommunal Local Urbanism Plan* (PLUi). New platforms, such as *Geoportail Urbanism*, are increasingly being developed. This platform provides digitalized urban documents with geo-referencing and harmonized data. The confidence in these data is high, but verification is required when the data update is long-standing.

At the medium scale (1:50,000–1:25,000), (1) built-up areas and (2) road and lifeline types are defined through the BD TOPO® (provided by IGN) and OSM databases (Table 2). For (3) urbanized areas, we assign a higher importance to official urban documents (PLU/PLUi), which are regularly updated but are not available for all municipalities. Municipalities without official urban planning are subject to National Urban Planning Regulations. The *MOS Normandy* substitutes for urban documents when the municipalities are subject to the National Planning Regulation. This database is available for Upper Normandy and is provided by the Normandy region (last updated in 2009) to obtain information about land cover and land use. The (4) agricultural and natural areas are defined based on four data sources. The agricultural areas are defined with RPG, which provides information about the crop type, and official urban documents define the boundaries of agricultural surfaces. Natural and protected surfaces are defined with BD TOPO® and the INPN and CdL databases.

At the large scale (1:25,000–1:10,000), most information concerning buildings, roads and lifelines is collected from BD TOPO® because of the spatial accuracy of the database. The OSM database is also used to complete the information obtained from BD TOPO®. In the results, the function and type of buildings are defined using this combination of data sources. To define physical injury, the function of the building and the number of floors must be known. In addition to these datasets, a third database (INSEE) can be exploited to obtain information about the number of people living in specific areas (200 × 200 tiles). Then, a weighting system can be used to estimate the population per building (physical injury).

At the local scale (1:10,000–1:2000), data about the building condition and construction material are gathered by photointerpretation or field data acquisition. The spatial footprint of the building comes from databases defined at the large scale. The construction date is available in the CETE databases and is provided under conditions. A complementary database is available concerning land prices at the communal scale (notarial database) to estimate the costs or benefits of buildings on the study sites.

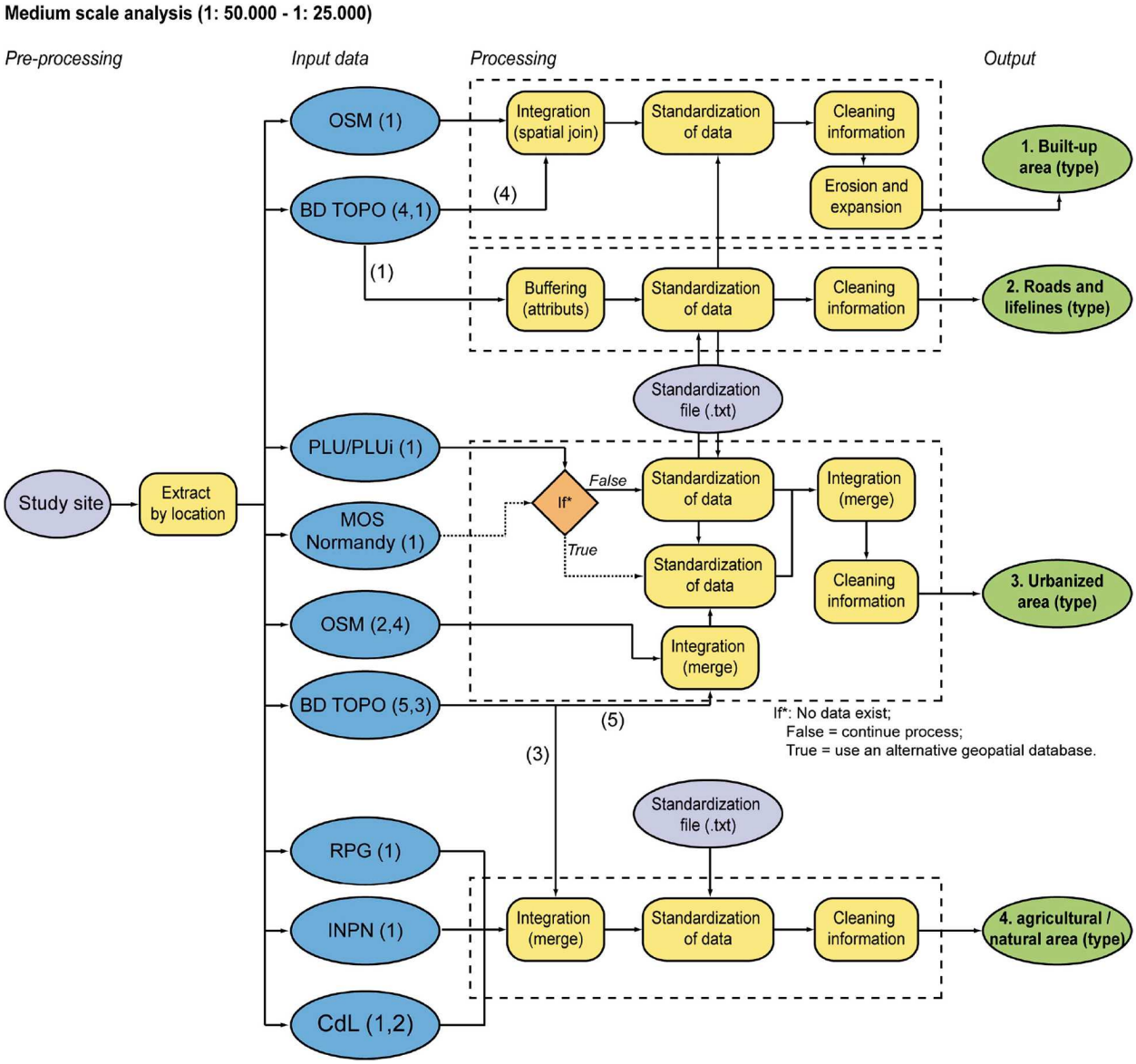


Fig. 3. Integration model for the medium-scale analysis with primitive visual scripting tools (model builder under the GIS environment).

2.4. Integration models

Once all criteria are defined (2.2) and the dataset is identified (2.3) for all analysis scales, the next step is the extraction, transformation and loading of GDBs into a final data warehouse (Biljecki, Heuvelink, Ledoux, & Stoter, 2018; Hanus, Pęska-Siwik, & Szewczyk, 2018; Yılmaz & Canıberk, 2018). This step, which is called the 'integration process' (pre-processing, input data, processing, and output Figs. 3 and 4), concerns only the medium- and large-scale analyses. Therefore, two integration models are produced to obtain adapted data corresponding to each scale. The first step (pre-processing) consists of delineation of the study area and extraction of the associated database. Concerning the input data shown in Fig. 3, the number following the source name corresponds to the data provided in Table 2. Third, to initiate the processing step and to automate data standardization, an extra pre-treated file is added. Therefore, these models two models extract data from database identify, transform (new classification) geometric primitives and/or attribute tables and load them in a final data warehouse.

For the integration model in the medium-scale analysis, thirteen databases from seven sources are used (Fig. 3). The aim is to obtain (1) built-up areas by simplification of attribute data and erosion-dilatation of the spatial extent of buildings. For (2) roads and lifelines, the road width information allows the spatial extent determined by the buffering process to be defined. At this scale, only the type is used to characterize the EaRs. The main difficulties concern (3) urbanized areas and (4) agricultural and natural areas because of the importance of the information provided by each GDB. For each criterion, the cleaning process consists of a visual check (photo-interpretation and field survey) to identify possible inconsistencies between different attribute fields in case of conflict between two information sources.

For the second integration model in the large-scale analysis (Fig. 4), the native resolution has been kept for the spatial extent of buildings to determine the four criteria (type, function, number of floors and estimated population). The number of floors and estimated population require complementary calculations. The type and function of buildings are defined from five data sources. BD TOPO® provides some of this information and can be completed by the OSM database, urban documents or regional databases. For network characterization, the spatial extent is the same as that of the medium scale, but more criteria are integrated in the analysis. Thus, we focused on the types of roads and lifeline, the number of lanes in each road and the traffic density. BD TOPO® provides all of this information.

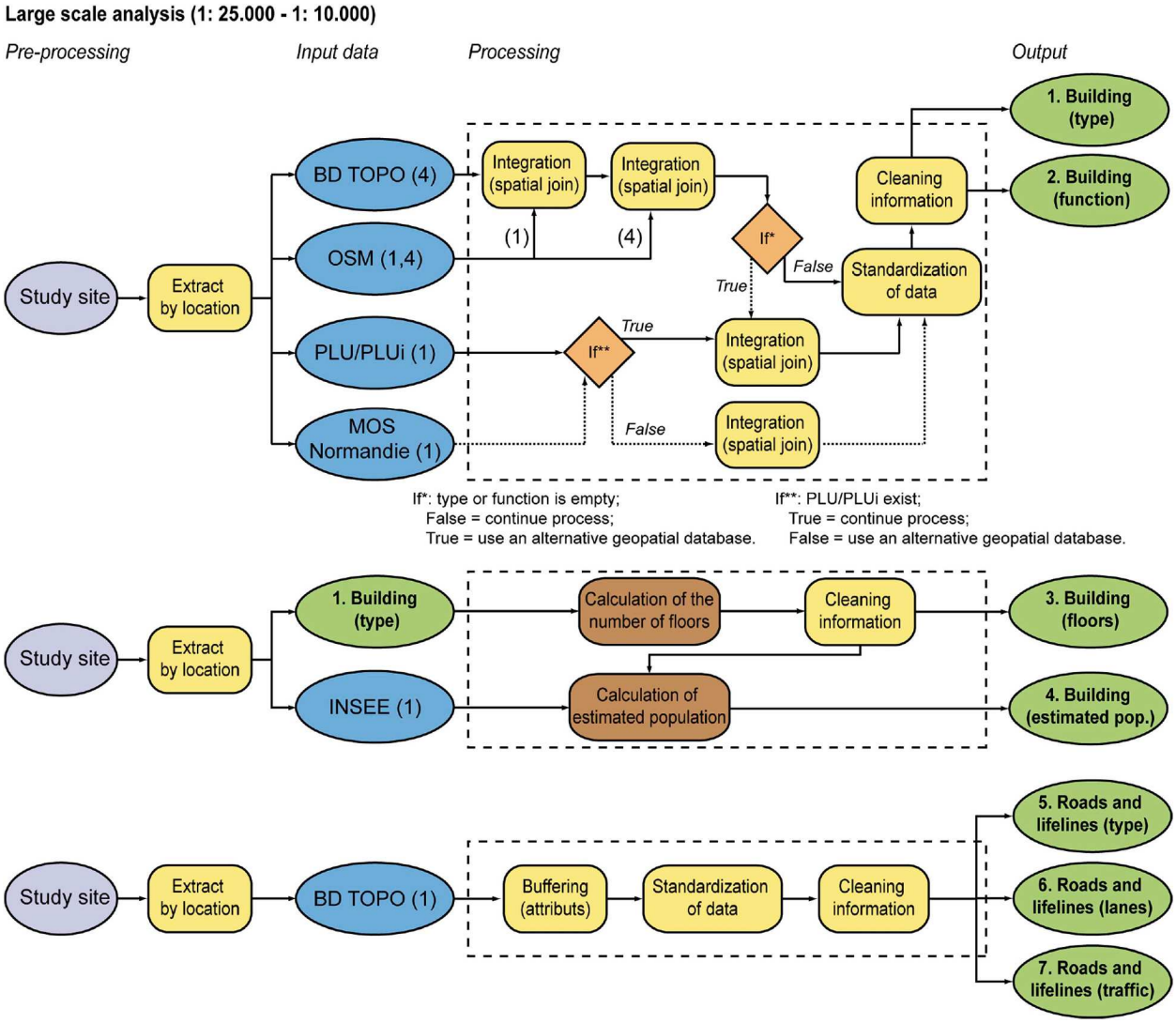


Fig. 4. Integration model for the large-scale analysis with primitive visual scripting tools (model builder under the GIS environment).

Table 3
Average floor elevation (f) based on European standards for different building types.

European standards	*f* (m)
House	3.0
Apartment	3.1
Office	3.9
Mixed use	3.5
Other	3.1

CTBUH. 2015. Height Calculator. http://www.ctbuh.org/.

To estimate the population of each building (for physical injuries), we must define (1) the living space (m^2), (2) number of floors, and (3) building footprint. Some authors use a unique average floor height value to identify the number of floors for all buildings (Martani, Cattarinussi, & Adey, 2018; Zhao, Myint, Wentz, & Fan, 2015). BD TOPO® provides information about the minimal and maximum heights of each building in the territory from photogrammetry (< 1 m accuracy). However, at our study sites, the height of the floors significantly varies according to the building type. Therefore, we have used the European standards defined by the *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (CTBUH) to define the average floor height for different building types (Table 3). For the maximum height based on the building type and European standard, we have defined the number of floors by dividing the maximum height by the average elevation of floors for each building type.

For the criterion 'estimated population by building' (Logan, Stults, & Xu, 2016), the INSEE database was associated with the total living space of each residential house, apartment and mixed-use building (Fig. 5). To obtain the living space, we have multiplied the number of floors by the surface area for residential buildings (Azad, Morinaga, & Kobayashi, 2018). Based on the population census, INSEE provides GDBs based on the number of people living in a 200 m × 200 m mesh size over all of the French territory. The population by mesh (*i*) has been reassigned for each residential building according to the total living space (*Ls*) of each building by mesh.

For the local-scale analysis, the CETE database has been used to obtain the date of building construction at the three study sites. The building condition and material construction have been acquired by photointerpretation or field campaign for a few buildings in selected areas according to their hazard proximity (Fressard, 2013; Letortu, 2013; Lissak, 2012). The spatial accuracy of the buildings and their types are obtained from large-scale databases in the data warehouse.

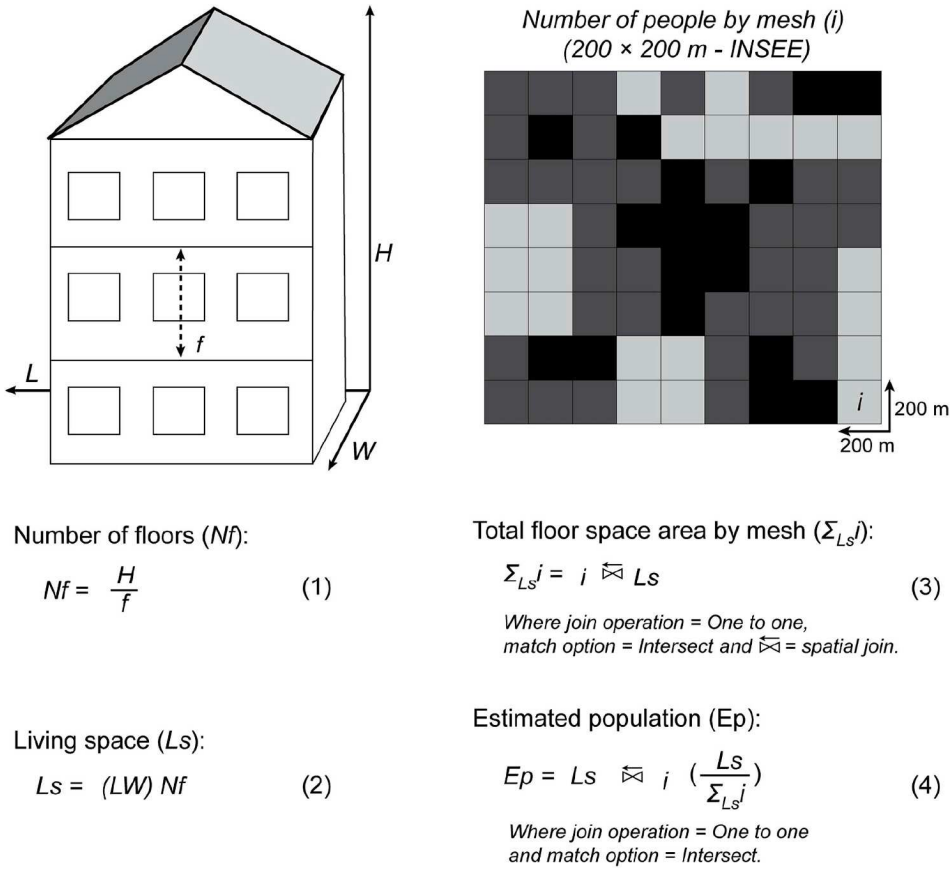


Fig. 5. Calculation model for the number of floors and estimated population by residential building (house, apartment and mixed use).

3. Study sites

Three study sites have been selected in French coastal environments (in the Normandy region) with distinctive characteristics to test the reliability and transposability of this method. These experimental study sites are affected by a range of hazards and issues and are located on the hedge (north-west) of the Parisian sedimentary basin. The first territory extends from Houlgate to Honfleur and covers 149 km^2 (Fig. 6). This site is the interface between the Touques River and the sea in the cuesta context. The average elevation is between 130 and 200 m with formation of a thick clavey-marly layer. The major problems of the first study site are linked to flash flood issues (Delahaye, 2008; Douvinet, Mallet, Escudier, Delahaye, & Christol, 2015) at the valley bottom, coastal and continental landslides (Maquaire, 1990; Fressard, 2013; Lissak et al., 2013) and marine submersions (Maanan & Robin, 2015; Letortu, 2013).

The second territory is east of Le Havre and extend from Quiberville to Puys (161 km^2). Three stream valleys (La Saâne Valley, La Scie Valley and L'Arques Valley from west to east) are arranged in alternating sequences with a chalky plateau (150 m altitude). Problems related to the second site are due to cliff retreat and rockfall (Maanan & Robin, 2015; 2002; Dewez, Rohmer, Regard, & Cnudde, 2013; Letortu, Costa, Bensaid, Cador, & Quénol, 2014), followed by the overflowed river in the valley bottom coupled with storm submersion and the relationship between the atmospheric pressure and climate indications (Delmas, Cerdan, Cheviron, Mouchel, & Eyrolle, 2012; Laignel et al., 2008; Turki, Laignel, Chevalier, Costa, & Massei, 2015). Lastly, runoff at the river basin head regularly leads to flash floods (Douvinet et al., 2015).

The third territory is east of Dieppe and extends from Criel-sur-Mer to Ault (174 km^2). This study site is similar to the second site and contains the Yères Valley and La Bresle Valley from west to east. The average altitude is between 100 and 120 m. This site has been the subject of resettlement of people from an integrated risk management perspective (Meur-Ferec, 2007). This type of management actually leads to strong societal constraints with risk prevention plans at this site (MATE/METL, 2016). In this third study site, the identified risks are similar to those of study site n°2 (cliff retreat, flash flood, and continental and marine floods).

All three territories benefit from a large number of GDBs from national or regional public organizations (*i.e.,* the BD TOPO® databases), research observatories and academic databases but have a lack of visibility concerning the spatial evolution of different hazards related to climate change and the evolution of concomitant areas (Delmonaco, Margottini, & Spizzichino, 2006; Marzocchi, Garcia-Aristizabal, Gasparini, Mastellone, & Di Ruocco, 2012; van Westen et al., 2014).

4. Results

The results and margins of error of the two integration models will be presented successively based on the analysis scale. The two models are first developed at study site n°1. Then, they are validated by random sampling with a 5% margin of error at the same site. Once the models are validated, they are transposed to study sites n°2 and 3. The different data warehouses produced from the two models can be used for multifunctional applications in terms of mapping, statistical analysis or land use and cover analyses.

4.1. Integration processes in the medium-scale analysis: land use and cover mapping

For the medium-scale analysis, thirteen databases are required to cover the 484 km^2 of the three studied territories. To provide simplified EaR information, the built-up area has been classified into eight categories and represents 1.7% (site n°1) to 2.7% (site n°2) of the total land

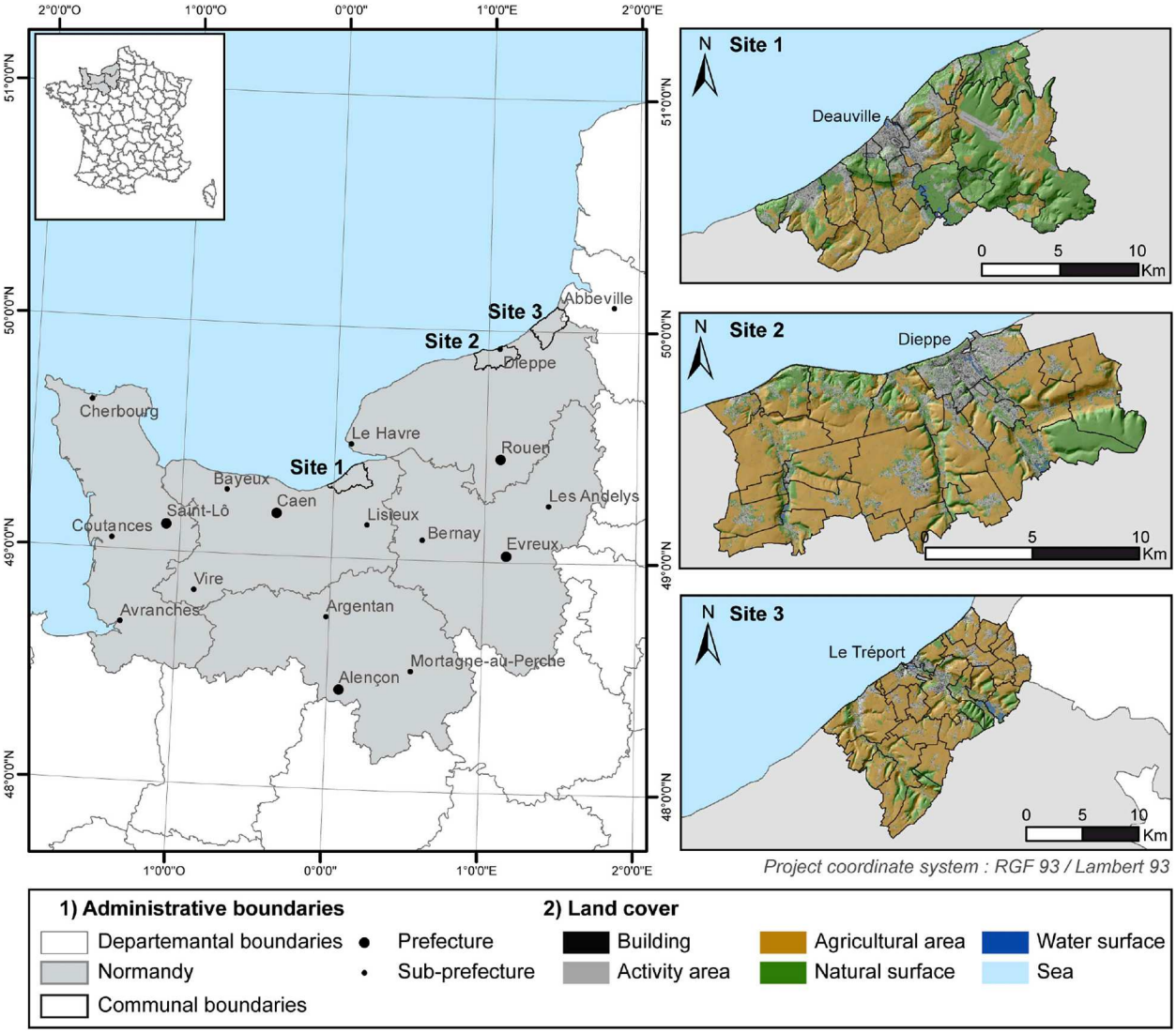


Fig. 6. Locations of the study areas. These three study sites are prone to multiple hazards in urbanized areas located in the valley bottoms.

area. Seven categories have been defined for roads and lifelines that represent between 1.8% and 2.3% of the total area. The average proportion of urbanized area varies from 12% (site n°3) to 20% (site n°1) and is defined in twelve categories. Natural and agricultural surfaces represent proportions between 76% (site n°1) and 82% (site n°2) and are divided into eight categories (Fig. 7).

The use of a unique GDB has proven insufficient to characterize all of the EaRs. In the case of urbanized areas, urban documents (urban plans) provide accurate information for residential areas (collective or housing), urban centres or areas to be urbanized. All of these urbanized areas represent 36% of the final adequate information (Fig. 7). To add information for farms, administrative areas, industrial areas, commercial areas, health centres and camps sites, BD TOPO® has been essential and has been associated with OSM databases to provide 64% of the global information.

OSM databases are particularly accurate (type and function) in highly urbanized areas, such as urban centres, and allow detection and rectification of some erroneous data (cleaning process). For natural and agricultural surfaces, urban documents provide information on boundaries but are insufficient to define the crop type. Consequently, the combination of the RPG and IGN databases provides information about crop, forest, and hedge types and about protected areas with the INPN and CdL databases (Fig. 8).

The temporal accuracy of the GDBs at the medium scale is directly linked to database updates. Updates of urban documents depend on municipalities. The IGN databases are upgraded every year, and the OSM databases are updated every day. Consequently, medium-scale databases must be easily and regularly updated. Prospectively, urban documents integrate land reserves (areas to be urbanized) at 15-year and 30-year terms, which enables predictions of future land use/cover changes (Johnson & Iizuka, 2016; Stehman, Fonte, Foody, & See, 2018) using non-random patterns. To ensure spatial accuracy, footprint data from public institutions have been prioritized for the VGI and digitalized data.

The data validation is based on the attribute accuracy. To validate EaR attributes, four EaRs have been identified (build-up, roads and lifelines, urbanized areas, and agricultural areas), and several items have been randomly selected. The number of chosen items is computed according to Cochran's formula (2007) (5). Then, each sample is checked by a field audit and photointerpretation with World Imagery (ESRI) or using Google Street View (Google).

$$Sample\ size = \frac{Z^2pq}{e^2} \tag{5}$$

where e is the number of items, Z is the Z-score with a 95% confidence level, e is the desired level of precision at 5%, p is the estimated proportion of an attribute that is present in the population and q is 1-p.

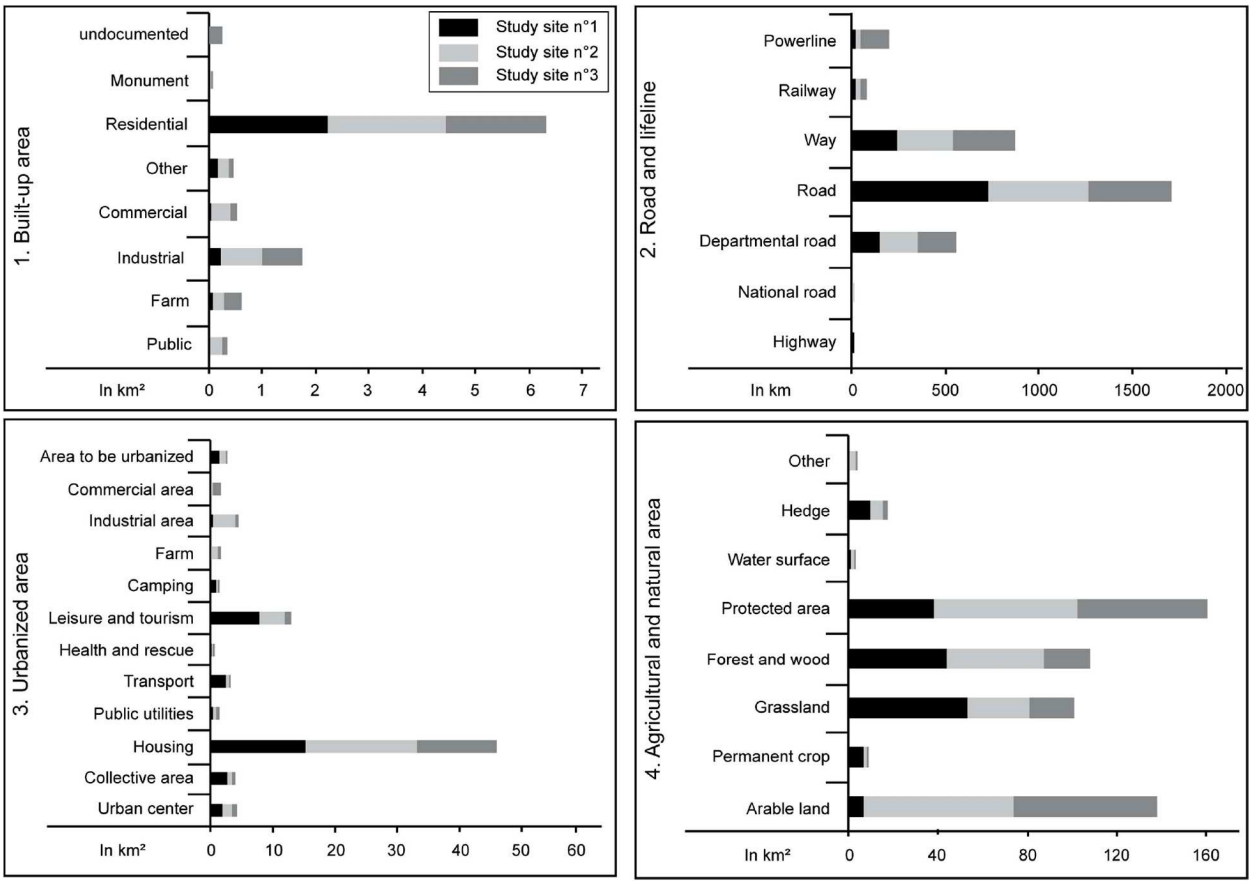


Fig. 7. Cumulated surface or linear areas for the four EaR types identified at the three study sites in coastal environments from thirteen GDBs.

Regarding our results, the built-up area accuracy varies between 85% and 90%. Roads and lifelines have the best accuracy, with 100% of the sample validated. Urbanized areas and agricultural and natural surfaces have an accuracy greater than 90%. Consequently, the margin of error of the data warehouse for the medium-scale analysis is below 10%, and the confidence degree is defined as sufficiently important for use in multifunctional applications.

4.2. Mapping, integration process and assessment of the calculation model for the large-scale analysis

At the large scale, the analysis is carried out for buildings, roads and lifelines. Four criteria have been defined: the type, function, number of floors and estimated population. The population is estimated for each building type (2.4). Thus, particular attention is given to the building type and function assessments to provide more accurate information. The model was run and validated at study site n°1 before being transposed to study sites n°2 and n°3.

To define the building types and functions, three GDBs have been used at study site n°1 (BD TOPO®, OSM databases and urban plans). Due to the spatial accuracy of the BD TOPO® database, it is used as a basis for the final database (especially for the location and building function items). BD TOPO® provides type and function information for 5% of the 31,251 buildings identified at site n°1 (Table 4). By integrating the OSM databases, the degree of information increases by 30%. A first cleaning phase is performed at this point in cases with conflicting information. For example, a building can be specified as an industrial building in BD TOPO® and as a commercial centre in the OSM databases. Consequently, field validation is performed to correct the final database (cleaning phase of the model in Fig. 4). Urban documents (PLU/PLUi) can complete missing information by defining residential buildings and specifying their types (housing or apartments).

It.1 is the first iteration with integration of the IGN databases, It.2 is the second iteration with integration of the OSM and IGN databases, and It.3 is the third iteration with integration of PLU/PLUi, OSM and BD TOPO®.

For study site n°1, the height is missing for 5426 building (17% of the global data). The margin of error (root mean square error (RMSE) 6) of the estimated population calculation (2.4) has been defined by comparison between the observed and predicted numbers of floors for 381 buildings.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum (Fo - Fp)^2}}{n} \tag{6}$$

where Fo is the number of floors observed, Fp is the number of floors predicted and n is the total amount of sample.

With this calculation model, 80% of the supplied information is accurate (Table 6), and the number of floors of one building tends to be overestimated with an RMSE at 0.78 (Fig. 9). Hence, the calculation model can be improved but is considered reliable enough for use at this analysis scale.

Once these criteria have been defined, the number of people in a 200 × 200 m mesh from INSEE are distributed in residential buildings according to their living space (Fig. 10). Roads and lifelines are extracted from BD TOPO® and are incorporated precisely in the medium-scale database.

Similar to the medium-scale analysis, data from the large-scale analysis are validated with randomly picked items, and the sample size has been defined with Cochran's formula (5). At this scale, the audit covers the criteria linked to buildings. The confidence degree of BD TOPO® concerning roads and lifelines is considered sufficiently important (Table 5) but has not been double checked. Furthermore, no

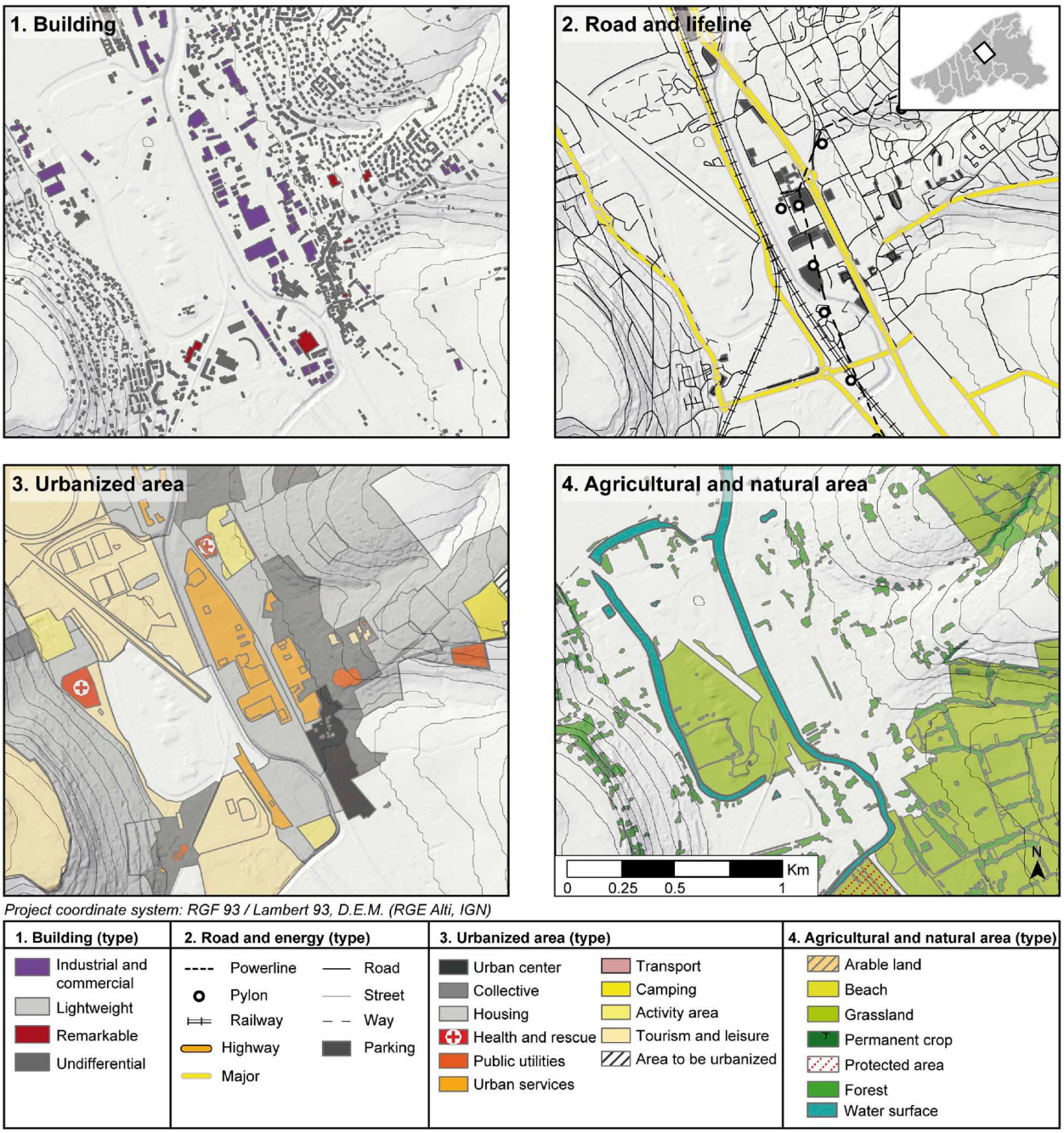


Fig. 8. Spatial representation of the databases for the medium-scale analysis at study site n°1.

Table 4
Attribute validation of the data warehouse for the medium-scale analysis with a margin of error of 5%.

Element at risk	Built-up	Roads and lifelines	Urbanized areas	Agricultural and natural areas	Total
Number of items	23,978	9117	1129	7441	41,665
Sample size	379	369	287	367	1402
Validation	336	369	260	339	1304
Non-identifiable*	25	0	12	0	37
Error	43	0	27	28	98
Validity	88.7%	100.0%	90.6%	92.4%	92.9%

data are available for the estimated population, and verification of this information is particularly complex because of the impossibility of determining the exact number of people per building in the field. This information is recorded in city halls but is not disseminated. Therefore, this criterion cannot be verified.

In view of the obtained results, the type of building has an accuracy between 85% and 90%. The economic function has better accuracy at greater than 90%. The number of floors is the least accurate with 80% of the sample validated. Consequently, the margin of error of the data warehouse for the large-scale analysis is approximately 13% and is considered sufficiently accurate.

Table 5
Number of buildings by type and function at study site n°1 at different integration phases.

Criterion 1 (type)	It.1	It.2	It.3	Criterion 2 (function)	It.1	It.2	It.3
House	0	0	13,101	Residential	0	0	19,630
Apartment	0	0	6525	Commercial	57	250	250
Office	0	126	126	Industrial	985	1009	1009
Farm	169	215	215	Farm	169	215	215
Industry	985	1009	1009	Administrative	26	72	72
Mall	57	125	125	Education	68	68	68
Castle	31	40	40	Health	0	37	37
Church	37	66	66	Tourism	0	219	219
Monument	27	27	27	Energy	188	188	188
Station	2	2	2	Leisure	0	164	164
Warehouse	0	3315	3315	Transport	2	2	2
Tower	7	7	7	Garage, shed, etc.	0	9331	9331
Complex	23	164	164	Religion	37	66	66
Shed/hut	12	6530	6529	Unknown	29,719	19,630	0
Unknown	29,901	19,625	0				

4.3. 3D mapping of structural components in the local-scale analysis for EaRs located in hazard-prone areas

The third scale concerns the analysis of EaRs at a local scale and focuses on structural aspects of the buildings. This analysis must be carried on few elements that are highly sensitive to various processes (flood, landslide, etc.) and consequently occur in hazard-prone areas. At study site n°1, plans for natural risk prevention have been used to identify the number of sensitive EaRs. Of the 31,251 buildings, 13,142 (42%) are located in hazard-prone areas. Among them, 8685 (28%) are affected by landslides, 4197 (13%) are located in flood zone areas (Fig. 11) and 260 (1%) may be affected by both flood and landslide hazards.

The model was applied to study sites n°2 (Fig. 12) and n°3. In fact, all municipalities in study site n°1 have harmonized urban documents (PLU/PLUi). Only 4 out of 21 PLU/PLUi at study site n°2 and 2 out of 23 are found at study site n°3. An alternative solution has been found to replace missing PLU/PLUi with other GDBs. The MOS Normandy database produced in 2009 at the regional scale provides the data sources for the two other study sites. The transposition of this model and these tools can be considered for other coastal or continental sites but requires adaptation of local GDBs.

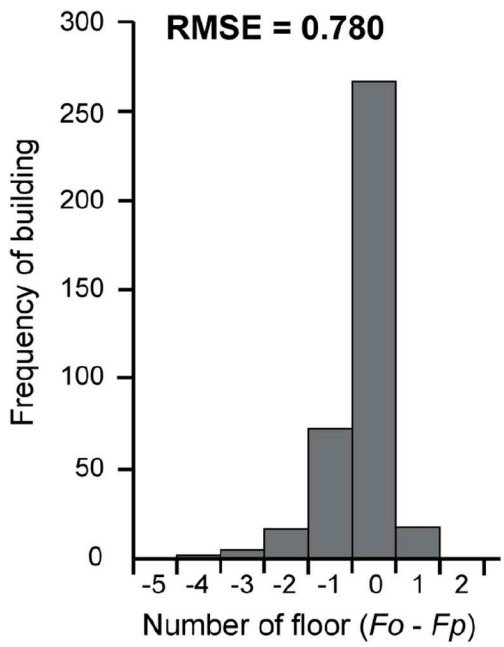


Fig. 9. Differences between observed and predicted floors for 381 buildings.

5. Discussion

The results from the data models at the medium (1:50,000–1:25,000) and large scales (1:25,000–1:10,000) depend largely on the spatial resolution and accuracy of the input databases. At each of three study sites, the level of accuracy of the input dataset is considered according to the geometry delineation and data attribute precision, database completeness, importance of the provided information, and semantic and temporal accuracy (Girres & Touya, 2010; Kresse & Fadaie, 2004). In the case of volunteered geographical information (VGI), such as the Open Street Map (OSM) databases (Haklay, 2010), there are offsets in the spatial footprint (Brovelli, Minghini, Molinari, & Zamboni, 2016) but good attributes and temporal accuracy due to regular updating by users. To resolve this issue, the geometry accuracy of BD TOPO® has been used as a reference, because it provides highly accurate building, network and natural surface locations (Betaille, Peyret, Ortiz, Miquel, & Godan, 2016). Then, spatial information from other databases has been integrated into BD TOPO®.

The results of our medium-scale analysis model are satisfactory (> 90%) due to harmonized intercommunal urban documents (last updated in 2012) for the whole of study site n°1. This accuracy will tend to decrease according to the availability and time validity of these documents at other study sites. The results concerning built-up areas (15% uncertainty) are mainly linked to erosion followed by expansion, which are partially generalized and can generate mistakes in attributed

Table 6
Determination of the confidence level of GDBs for the large-scale analysis (building) with a margin of error of 5%.

Element at risk	Building (type)	Building (function)	Building (number of floor)	Building (estimated population)	Total
Number of items	31,319	31,319	31,319	ND	31,319
Sample size	381	381	381	ND	1143
Validation	339	349	307	ND	995
Error	42	32	74	ND	148
Validity	88.9%	91.6%	80.6%	ND	87.1%

ND is non-documented.

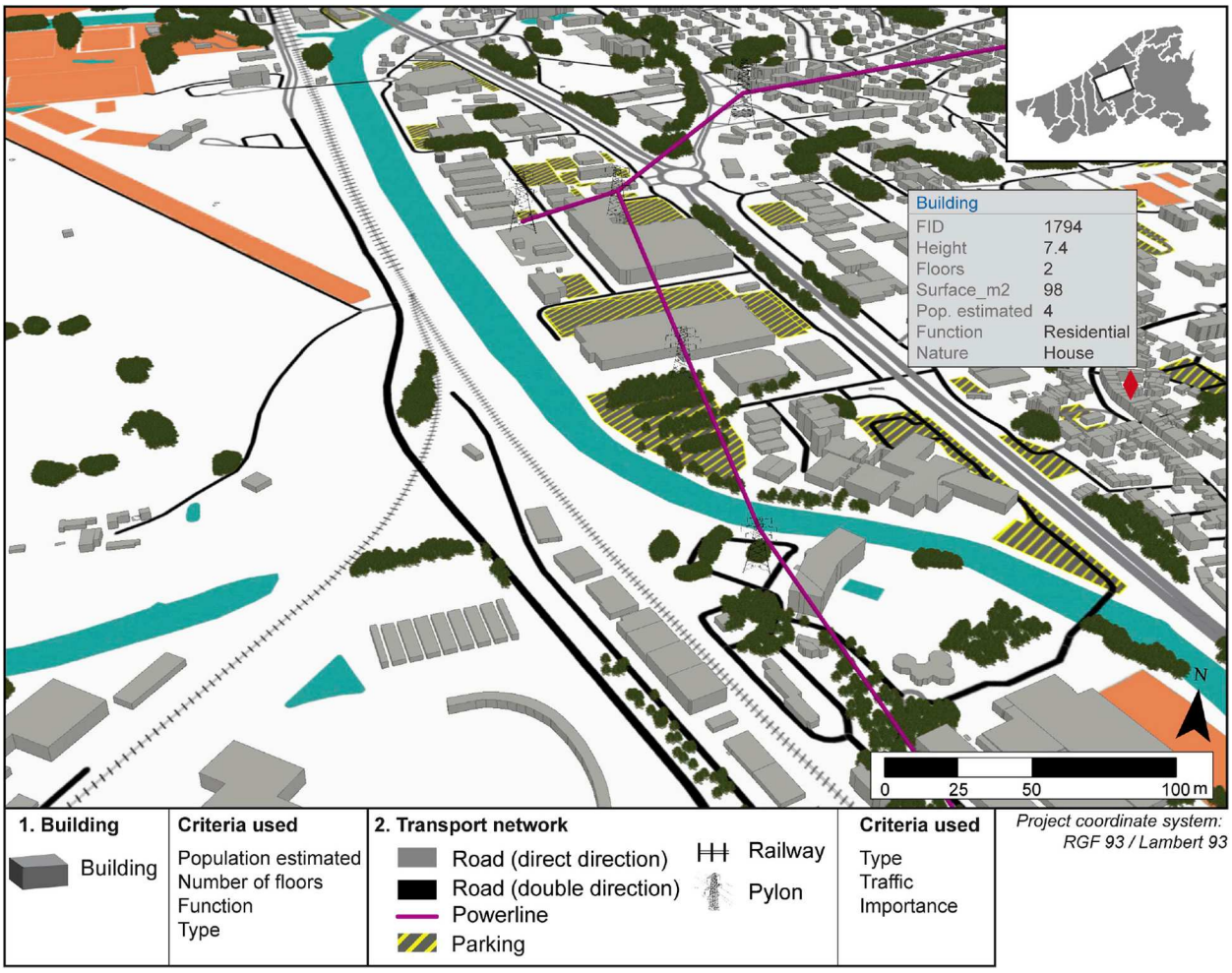


Fig. 10. 3D mapping for the large-scale analysis with different criteria for a portion of study site n°1.

data (particularly in highly urbanized areas). In the large-scale analysis, uncertainties mainly concern computation of the number of floors (20% uncertainty). In addition, this uncertainty increases if cellars are considered (actually, none of the data provide this information, because the method used to compute the number of floors concerns exclusively aboveground elements). The criteria concerning the building type and function and the roads and lifelines are high (≥90%) due to merging of the OSM and BD TOPO® databases. Concerning building characterization, the highest density of urban areas increases the accuracy of this attribute thanks to the VGI databases. In the local-scale (1:10,000–1:2000) analysis, data are collected in the field, through photointerpretation or using software (such as *Google Street Map*), and thus the confidence degree is highest.

The main challenge of our study is the standardization phase of the various databases. This step is crucial for the models. For the medium-scale model, thirteen databases are needed to extract, transform and load the final data warehouse (Johansson et al., 2017), and seven databases are needed for the large-scale model. Generally, this standardization phase is based on Urban Atlas, Corine Land Cover, OSM or GMESUA standardization (Campelo et al., 2017; Jokar Arsanjani et al., 2015). However, these terminologies are adapted to define land use or land cover in the small-scale analysis, and adaptation is necessary to describe EaRs at the medium, large and local scales. Furthermore, one EaR has one or more criteria, and an increased number of criteria for the same element enhances the complexity of the integration phase.

Checking whether the information provided for specific criteria is sufficiently precise or requires an upgrade with another database represents a difficulty. To check the correct connection between the input and upgraded data, defining the order of the execution model is fundamental. This step includes knowing the degree of information and importance provided by each database. For example, urban documents (PLU/PLUi) provide the first information for agricultural areas, but no information is given about the agriculture type. The RPG database provides information on the use of individual agricultural plots (Cantelaube & Carles, 2014) through volunteered geographical information. The combination of these two databases provides information about the official limit of the agricultural area, limit of the plots and type of agricultural plots.

Once integration and transformation are completed, a verification and cleaning process is performed to avoid inconsistencies or missing information. This phase is more complex for the large-scale model than for the medium-scale model due to the number of criteria that need to be checked. In certain cases, conflict exists between information provided from two different databases. For example, BD TOPO may have identified the function of a building as an industrial building, while the OSM database indicates that this industrial building is actually a shopping centre. Therefore, the verification requires further analysis by field observation, photointerpretation or use of software, such as *Google Maps* or *Google Earth*. After this phase, the degree of confidence for all data produced must be assessed according to verification of the margin of error. The random sampling process (Cochran, 2007) has shown than the margin of error is below 10% at the medium scale and is approximately 15% at the large scale. Consequently, the confidence degree of the produced data is defined as sufficiently important for use in

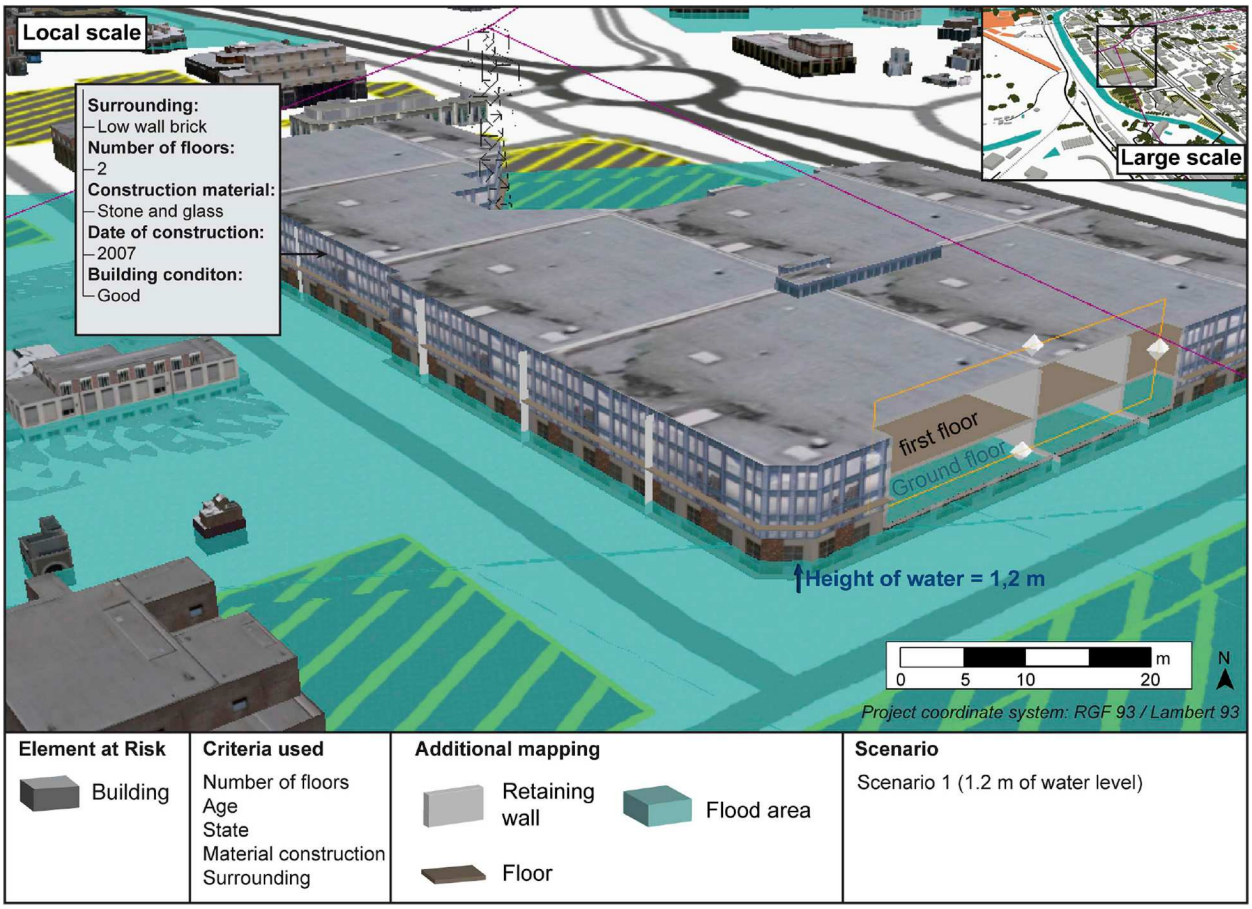


Fig. 11. EaRs identified in flood zone areas for a 1.2 m water level at the local scale.

multifunctional applications and by multiple users.

The time validity of GDBs is a recurring issue in the literature (Devillers & Jeansoulin, 2006; Zhang et al., 2018). This question highlights the problem of upgrading and managing spatial data (Fonte et al., 2017). Near real-time systems have begun to be developed (Yılmaz & Canıberk, 2018) but require significant resources and will depend on the type of data integrated. At the three study sites, the OSM databases are updated every hour and are the closest source of near real-time data. BD TOPO® is updated every year (Girres & Touya, 2010), and the other databases are updated every two years, five years and more for urban documents. This question of updates will directly impact risk assessment and management. As shown in Fig. 12, buildings destroyed during the summer of 2013 (Michoud et al., 2015) appear on orthophotographs from 2012 but are missing from the 2017 version of the GDBs. The two models presented at the medium and large scales have been planned for relatively fast and easy upgrades. The main constraint and time spent updating will be linked to the standardization or transformation phase in the case of a new element to be incorporated. These models are optimized for annual updates.

The replicability of models at study sites n°2 and n°3 have be applied quickly. The main difficulties are related to integration of new databases at the medium and large scales that do not exist at study site n°1. Furthermore, unlike those of study site n°1, urban documents are not harmonized at study sites n°2 and n°3. Only four of twenty-one urban documents at study site n°2 and two of twenty-three at study site n°3 were available. Other communes were found in the National Urban Planning Regulation. Therefore, the MOS Normandy database has been used to make up for the absence of these urban documents. For study site n°3, eleven of twenty-three communes are located in other departments and have no urban documents. Therefore, the CdL database, which provides information about land cover, has been used to fill the data gaps, and then the type of urban area has been identified by photointerpretation. Similar to the data updates, the main difficulty in transposing the models is the standardization and transformation of the input data. A complete inventory of datasets available for the study sites and their quality is required before executing the models.

In other countries, the replicability of the methods will depend on the amount of data available. In Europe and Greenland, forty-one national agencies have been identified (Olteanu-Raimond et al., 2017) that acquire topographic data, such as the National Geographic Institute of Belgium or National Land Survey of Finland. The combined use of national and VGI databases (Bol et al., 2016) will significantly increase the accuracy of the data even more if the countries have data in administrative units with urban documents.

6. Conclusion

The geographical database produced from institutional, volunteered geographic information and archive sources allowed elements at risk analysis at three scales. Analysis at the medium scale shifted the emphasis to surface analysis, which compared different elements present at the same site on the same basis. Large-scale analysis adds additional information about infrastructure to the analysis based on integrated physical injury of people in each building and the functional and structural aspects. Finally, the local-scale analysis takes into account intrinsic parts of the infrastructure by integrating material construction, surroundings, date of construction, etc. Therefore, these GDBs are set for multifunctional usage through a series of spatial or attribute requests for extraction of 2D or 3D maps or statistical elements.

In the medium-scale analysis, the elements at risk are characterized

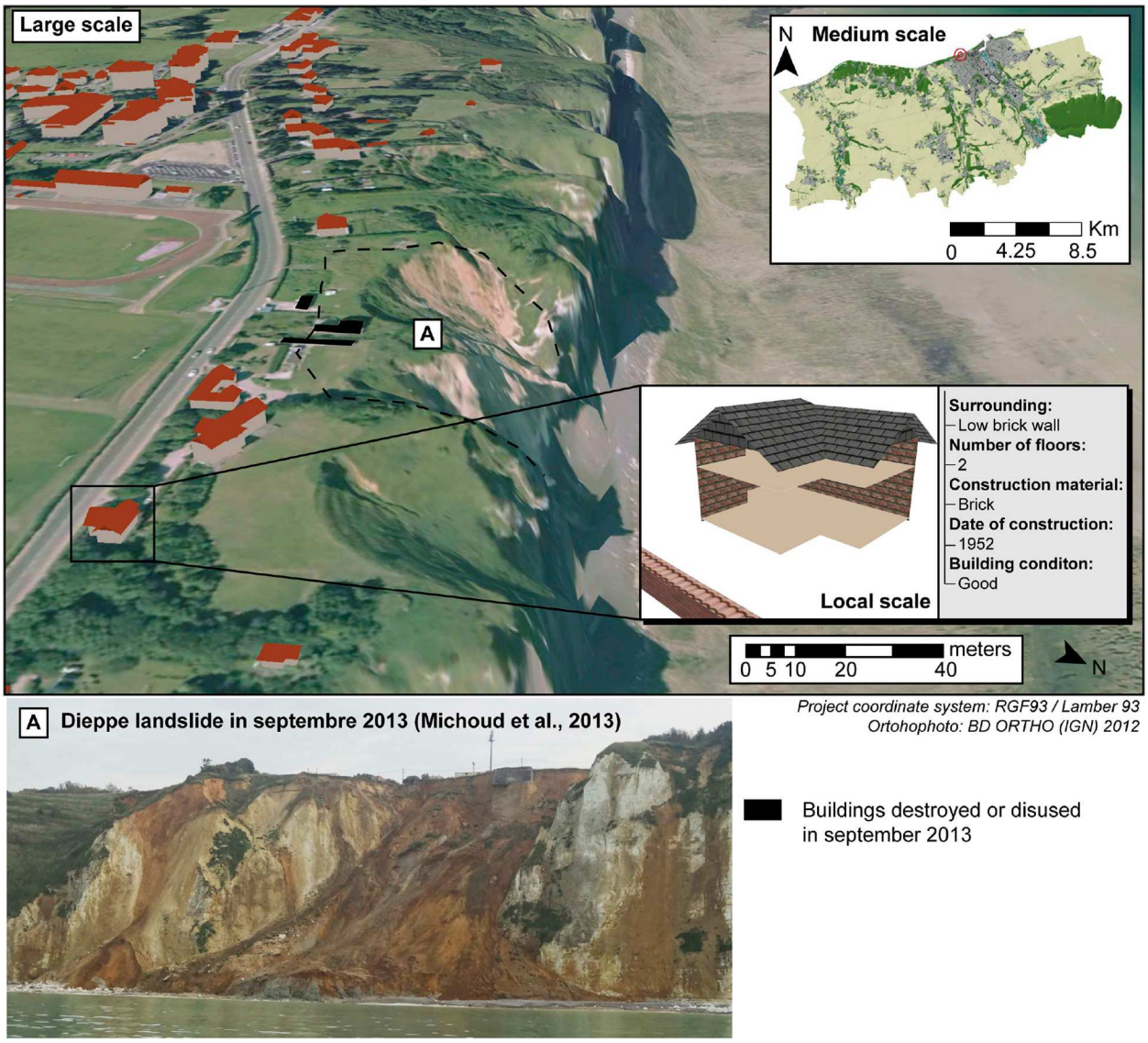


Fig. 12. Replicability of the integration models with updated data from 2017 for study site n°2.

using four criteria (type) with uncertainties of less than 10%. In the large-scale analysis, the uncertainties are approximately 15%. In the local-scale analysis, no uncertainties exist, because the data are collected from field observations, photointerpretation or using software (such as *Google Street View*). Consequently, determining the confidence degree of each data warehouse for different analysis scales is sufficiently important prior to their use in potential consequence analyses.

From these GDBs, the objective will be to set up an index from criteria obtained using a weighting system, such as the Potential Damage Index (Maquaire et al., 2004; Malet et al., 2006; Puissant et al., 2013; Carlier et al., 2017), Relative Vulnerability Index (Kappes et al., 2012; van Westen et al., 2014) or fuzzy logic method (Thiery, 2007; Castillo Soto, 2012; Grekousis & Thomas, 2012; Fressard, 2013; Potter, Doran, & Mathews, 2016). This quantification will serve to assess potential consequences at the three study sites a priori of hazard-prone areas. Finally, these potential consequences will be coupled with vulnerability analysis for each type of hazard in a multi-risk analysis approach (Chen et al., 2016; Godfrey et al., 2015).

Finally, this method can be transferred to technical services for risk analyses to increase the assessment of elements at risk in the *Risk Prevention Plan* (PPR in France). The quick installation of this method at different study sites supports the integration of physical, infrastructural and functional components.

Acknowledgements

This research was supported by the COMUE Normandy University which has financed the PhD grant of KG and by the ANR scientific project “RICOCHET: multi-RIsk assessment on Coastal territory in a global CHange context” funded by the French Research National Agency (ANR-16-CE03-0008).

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102076.

References

Ambrosi, C., Strozzi, T., Scapozza, C., & Wegmüller, U. (2018). Landslide hazard assessment in the Himalayas (Nepal and Bhutan) based on Earth-Observation data. *Engineering Geology, 237*, 217–228. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.020.

Armaş, I., Ionescu, R., Gavriş, A., & Toma-Danila, D. (2016). Identifying seismic vulnerability hotspots in Bucharest. *Applied Geography, 77*, 49–63. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.10.001.

Azad, S. P., Morinaga, R., & Kobayashi, H. (2018). Effect of housing layout and open space

morphology on residential environments–applying new density indices for evaluation of residential areas case study: Tehran, Iran. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 17*, 79–86. https://doi.org/10.3130/jaabe.17.79.

Betaille, D., Peyret, F., Ortiz, M., Miquel, S., & Godan, F. (2016). Improving accuracy and integrity with a probabilistic Urban Trench modeling. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation, 63*, 283–294.

Bianchini, S., Solari, L., & Casagli, N. (2017). A GIS-based procedure for landslide intensity evaluation and specific risk analysis supported by persistent scatterers interferometry (PSI). *Remote Sensing, 9*, 1093. https://doi.org/10.3390/rs9111093.

Biljecki, F., Heuvelink, G. B. M., Ledoux, H., & Stoter, J. (2018). The effect of acquisition error and level of detail on the accuracy of spatial analyses. *Cartography and Geographic Information Science, 45*, 156–176. https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1279986.

Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., et al. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. *Natural Hazards, 67*, 193–211. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (2014). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters.* Routledge.

Bol, D., Grus, M., Laakso, M., 2016. Crowdsourcing and VGI in national map agency data collection, in: Proceedings of 6th international conference on cartography and GIS, june 13-17, 2016, (Albena, Bulgaria).

Brovelli, M. A., Minghini, M., Molinari, M. E., & Zamboni, G. (2016). Positional accuracy assessment of the openstreetmap buildings layer through automatic homologous pairs detection: The method and a case study. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B2,* 615–620. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B2-615-2016.

Campelo, C. E. C., Bertolotto, M., & Corcoran, P. (Eds.). (2017). *Volunteered geographic information and the future of geospatial data*Hershey PA: IGI Global: Information Science Reference. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2446-5.

Camarasa Belmonte, A. M., López-García, M. J., & Soriano-García, J. (2011). Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. *Applied Geography, 31*, 136–145. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.03.003.

Cantelaube, P., & Carles, M. (2014). *Le registre parcellaire graphique: Des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole. Le cahier des techniques de lINRA, Vols. 58–64* (N Spécial GéoExpé).

Carlier, B., Puissant, A., Dujarric, C., & Arnaud-Fassetta, G. (2017). Improvement of an index oriented methodology for consequence analysis of natural hazards: Application to the upper guil catchment (southern French alps). *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions,* 1–25. https://doi.org/10.5194/nhess-2017-323.

Carpignano, A., Golia, E., Di Mauro, C., Bouchon, S., & Nordvik, J. (2009). A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: First application. *Journal of Risk Research, 12*, 513–534. https://doi.org/10.1080/13669870903050269.

Cascini, L., Peduto, D., Pisciotta, G., Arena, L., Ferlisi, S., & Fornaro, G. (2013). The combination of DInSAR and facility damage data for the updating of slow-moving landslide inventory maps at medium scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 13*, 1527–1549. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1527-2013.

Castillo Soto, M. E. (2012). The identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology. *Applied Geography, 35*, 199–207. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.001.

Chen, L., van Westen, C. J., Hussin, H., Ciurean, R. L., Turkington, T., Chavarro-Rincon, D., et al. (2016). Integrating expert opinion with modelling for quantitative multi-hazard risk assessment in the Eastern Italian Alps. *Geomorphology, 273*, 150–167. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.041.

Cochran, W. G. (2007). *Sampling techniques.* John Wiley & Sons.

Costa, S., Delahaye, D., Freire-Diaz, S., Davidson, R., Laignel, B., & Di Nocera, L. (2002). Quantification par analyse photogramétrique du recul des falaises et des apports en galets corrélatifs (Haute-Normandie, France). In D. Delahaye, F. Levoy, & O. Maquaire (Eds.). *Symposium geomorphology: From expert opinion to modelling* (pp. 205–214). 26-27 april 2002. Strasbourg.

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., et al. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change, 18*, 598–606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013.

Defossez, S., Vinet, F., & Leone, F. (2017). Assessing vulnerability to flooding: Progress and limitations. *Floods* (pp. 241–257). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-268-7.50014-6.

Delahaye, D. (2008). Modeling the watershed as a complex spatial system: A review. *The modeling process in geography: From determinism to complexity* (pp. 191–215). .

Delmas, M., Cerdan, O., Cheviron, B., Mouchel, J.-M., & Eyrolle, F. (2012). Sediment export from French rivers to the sea: French sediment exports. *Earth Surface Processes and Landforms, 37*, 754–762. https://doi.org/10.1002/esp.3219.

Delmonaco, G., Margottini, C., & Spizzichino, D. (2006). ARMONIA methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps. *Deliverable, 3* 1. 1, ARMONIA.

Devillers, R., & Jeansoulin, R. (2006). Spatial data quality: Concepts. In R. Devillers, & R. Jeansoulin (Eds.). *Fundamentals of spatial data quality* (pp. 31–42). London, UK: ISTE. https://doi.org/10.1002/9780470612156.ch2.

Dewez, T. J. B., Rohmer, J., Regard, V., & Cnudde, C. (2013). Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: Case study from mesnil val (Normandy, northern France). *Journal of Coastal Research, 65*, 702–707. https://doi.org/10.2112/SI65-119.1.

Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., & Arnold, M. (2005). *Natural disaster hotspots: A global risk analysis, disaster risk management series.* Washington, D.C: World Bank.

Douvinet, J., Mallet, F., Escudier, A., Delahaye, D., & Christol, A. (2015). La simulation comme outil d'anticipation des crues rapides dans les petits bassins versants en Seine-Maritime. *Revue Internationale de Géomatique, 25*, 99–122. https://doi.org/10.3166/RIG.25.99-122.

Eckert, S., Jelinek, R., Zeug, G., & Krausmann, E. (2012). Remote sensing-based assessment of tsunami vulnerability and risk in Alexandria, Egypt. *Applied Geography, 32*, 714–723. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.003.

Ernoul, L., Wardell-Johnson, A., Willm, L., Béchet, A., Boutron, O., Mathevet, R., et al. (2018). Participatory mapping: Exploring landscape values associated with an iconic species. *Applied Geography, 95*, 71–78. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.013.

Fonte, C., Minghini, M., Patriarca, J., Antoniou, V., See, L., & Skopeliti, A. (2017). Generating up-to-date and detailed land use and land cover maps using OpenStreetMap and GlobeLand30. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 6*, 125. https://doi.org/10.3390/ijgi6040125.

Foody, G. M., See, L., Fritz, S., van der Velde, M., Perger, C., Schill, C., et al. (2015). Accurate attribute mapping from volunteered geographic information: Issues of volunteer quantity and quality. *The Cartographic Journal, 52*, 336–344. https://doi.org/10.1080/00087041.2015.1108658.

Fressard, M. (2013). *Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France) Caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation (Physical geography).* Caen: University of Caen.

Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management, 168*, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011.

Girres, J.-F., & Touya, G. (2010). Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset: Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset. *Transactions in GIS, 14*, 435–459. https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01203.x.

Godfrey, A., Ciurean, R. L., van Westen, C. J., Kingma, N. C., & Glade, T. (2015). Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach – an application in Nehoiu Valley, Romania. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 13*, 229–241. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.001.

Grekousis, G., & Thomas, H. (2012). Comparison of two fuzzy algorithms in geodemographic segmentation analysis: The Fuzzy C-Means and Gustafson–Kessel methods. *Applied Geography, 34*, 125–136. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.004.

Haklay, M. (2010). How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and ordnance survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design, 37*, 682–703. https://doi.org/10.1068/b35097.

Hanus, P., Pęska-Siwik, A., & Szewczyk, R. (2018). Spatial analysis of the accuracy of the cadastral parcel boundaries. *Computers and Electronics in Agriculture, 144*, 9–15. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.031.

Hénaff, A., & Philippe, M. (2014). Littoral, environnement, télédétection, géomatique. *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines: Guide mXéthodologique. Équipe littoral, environnement, télédétection, géomatique* (Plouzané).

Johansson, T., Olofsson, T., & Mangold, M. (2017). Development of an energy atlas for renovation of the multifamily building stock in Sweden. *Applied Energy, 203*, 723–736. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.027.

Johnson, B. A., & Iizuka, K. (2016). Integrating OpenStreetMap crowdsourced data and Landsat time-series imagery for rapid land use/land cover (LULC) mapping: Case study of the Laguna de Bay area of the Philippines. *Applied Geography, 67*, 140–149. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.12.006.

Jokar Arsanjani, J., Mooney, P., Zipf, A., & Schauss, A. (2015). Quality assessment of the contributed land use information from OpenStreetMap versus authoritative datasets. In J. Jokar Arsanjani, A. Zipf, P. Mooney, & M. Helbich (Eds.). *OpenStreetMap in GIScience* (pp. 37–58). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14280-7_3.

Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards, 64*, 1925–1958. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2.

Kappes, M. S., Malet, J.-P., Remaître, A., Horton, P., Jaboyedoff, M., & Bell, R. (2011). Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 11*, 627–641. https://doi.org/10.5194/nhess-11-627-2011.

Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography, 32*, 577–590. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002.

Kresse, W., & Fadaie, K. (2004). *ISO standards for geographic information.*

Kubal, C., Haase, D., Meyer, V., & Scheuer, S. (2009). Integrated urban flood risk assessment–adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 9*, 1881–1895.

Laignel, B., Costa, S., Lequien, A., Massei, N., Durand, A., Dupont, J. P., et al. (2008). Current inputs of continental sediment to the English channel and its beaches: A case study of the cliffs and littoral rivers of the western paris basin. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues, 52*, 21–39. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2008/0052S3-0021.

Letortu, P. (2013). *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en manche centrale et orientale: De la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits (physical geography).* Caen: University of Caen.

Letortu, P., Costa, S., Bensaid, A., Cador, J.-M., & Quénol, H. (2014). Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-normandie (France) : Méthodologie et variabilité du recul. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement, 20*, 133–144. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10588.

Li, C., Cheng, X., Li, N., Du, X., Yu, Q., & Kan, G. (2016). A framework for flood risk analysis and benefit assessment of flood control measures in urban areas. *International*

Journal of Environmental Research and Public Health, 13, 787. https://doi.org/10.3390/ijerph13080787.
Lissak, C. (2012). *Coastal landslides of the Pays d'Auge (Calvados): Morphology, functioning and risk management. (Physical geography).* Caen: University of Caen.
Lissak, C., Maquaire, O., Puissant, A., & Malet, J.-P. (2013). Landslide consequences and post crisis management along the coastal slopes of Normandy, France. *Landslide science and practice* (pp. 23–30). Springer.
Logan, J. R., Stults, B. J., & Xu, Z. (2016). Validating population estimates for harmonized census tract data, 2000–2010. *Annals of the Association of American Geographers, 106*, 1013–1029. https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1187060.
Maanan, M., & Robin, M. (Eds.). (2015). *Sediment fluxes in coastal areas, Coastal research library*. Dordrecht Heidelberg New York.227: Springer.
Malet, J.-P., Thiery, Y., Maquaire, O., & Puissant, A. (2006). Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque glissement de terrain. *Revue Internationale de Géomatique, 16*, 499–525.
Maquaire, O. (1990). *Les mouvements de terrain de la côte du calvados recherche et prévention.* Orléans: BRGM.
Maquaire, O., Weber, C., Thiery, Y., Puissant, A., & Malet, J.-P. (2004). Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins. Identification of exposed elements with a semi-automatic procedure. In: *Proc. 9th int. Symp. On landslides* (pp. 171–176). Rio de Janeiro, Brazil: Balkema.
Martani, C., Cattarinussi, L., & Adey, B. T. (2018). A new process for the evaluation of the net-benefit of flexible ground-floor ceiling in the face of use transition uncertainty. *Journal of Building Engineering, 15*, 156–170. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.019.
Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L., & Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: A case study in Italy. *Natural Hazards, 62*, 551–573. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x.
MATE/METL (2016). Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL). *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, (MATE), Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement (METL)*. La Documentation Française.
Meur-Ferec, C. (2007). *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : Un itinéraire de géographe. (Habilitation à diriger des recherches).* Nantes: Université de Nantes.
Meyer, V., Haase, D., & Scheuer, S. (2009a). Flood risk assessment in European river basins—concept, methods, and challenges exemplified at the Mulde river. *Integrated Environmental Assessment and Management, 5*, 17–26.
Meyer, V., Scheuer, S., & Haase, D. (2009b). A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural Hazards, 48*, 17–39. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9244-4.
Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., et al. (2015). Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. *Landslides, 12*, 403–418. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0542-5.
Olteanu-Raimond, A.-M., Hart, G., Foody, G. M., Touya, G., Kellenberger, T., & Demetriou, D. (2017). The scale of VGI in map production: A perspective on european national mapping agencies: VGI and the national mapping agencies. *Transactions in GIS, 21*, 74–90. https://doi.org/10.1111/tgis.12189.
Papathoma-Köhle, M., Gems, B., Sturm, M., & Fuchs, S. (2017). Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Reviews, 171*, 272–288. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.007.
Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., & Dominey-Howes, D. (2007). Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 7*, 765–779.
Petrucci, O., & Gullà, G. (2010). A simplified method for assessing landslide damage indices. *Natural Hazards, 52*, 539–560. https://doi.org/10.1007/s11069-009-9398-8.
Potter, S., Doran, B., & Mathews, D. (2016). Modelling collective Yawuru values along the foreshore of Roebuck Bay, Western Australia using fuzzy logic. *Applied Geography, 77*, 8–19. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.016.
Puissant, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J.-P., & Maquaire, O. (2013). Landslide consequence analysis: A region-scale indicator-based methodology. *Landslides, 11*, 843–858. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0429-x.
Reghezza-Zitt, M., & Rufat, S. (2016). *Resilience imperative: Uncertainty, risks and disasters.* Elsevier.
Scheuer, S., Haase, D., & Meyer, V. (2011). Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: From a starting point view towards an end point view of vulnerability. *Natural Hazards, 58*, 731–751. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9666-7.
Stehman, S. V., Fonte, C. C., Foody, G. M., & See, L. (2018). Using volunteered geographic information (VGI) in design-based statistical inference for area estimation and accuracy assessment of land cover. *Remote Sensing of Environment, 212*, 47–59. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.014.
Thiery, Y. (2007). *Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant' : Cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste (physical geography).* Caen: University of Caen.
Timmerman, P. (1981). *Vulnerability resilience and collapse ofsociety. A ReviewofModels and possible climatic appli-cations.* Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
Turki, I., Laignel, B., Chevalier, L., Costa, S., & Massei, N. (2015). On the investigation of the sea-level variability in coastal zones using SWOT satellite mission: Example of the eastern English channel (western France). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8*, 1564–1569. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2419693.
UNISDR (2017). Terminology on disaster risk reduction. Geneva. Available from: http://unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng.htm.
Uzielli, M., Catani, F., Tofani, V., & Casagli, N. (2015). Risk analysis for the ancona landslide—II: Estimation of risk to buildings. *Landslides, 12*, 83–100. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0477-x.
Van Westen, C. J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics, 21*, 241–255.
Van Westen, C., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65*, 167–184.
Vojinovic, Z., Hammond, M., Golub, D., Hirunsalee, S., Weesakul, S., Meesuk, V., et al. (2016). Holistic approach to flood risk assessment in areas with cultural heritage: A practical application in ayutthaya, Thailand. *Natural Hazards, 81*, 589–616. https://doi.org/10.1007/s11069-015-2098-7.
van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology, 102*, 112–131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010.
van Westen, C., Kappes, M. S., Luna, B. Q., Frigerio, S., Glade, T., & Malet, J.-P. (2014). Medium-scale multi-hazard risk assessment of gravitational processes. In T. Van Asch, J. Corominas, S. Greiving, J.-P. Malet, & S. Sterlacchini (Eds.). *Mountain risks: From prediction to management and governance* (pp. 201–231). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6769-0_7.
Yılmaz, A., & Canıberk, M. (2018). Real time vector database updating system: A case study for Turkish topographic vector database (TOPOVT). *International Journal of Engineering and Geosciences, 3*(2), 73–79. https://doi.org/10.26833/ijeg.383054.
Ženka, J., Slach, O., Krtička, L., & Žufan, P. (2016). Determinants of microregional agricultural labour productivity – evidence from Czechia. *Applied Geography, 71*, 83–94. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.04.004.
Zhang, G., Zhu, A.-X., Huang, Z.-P., Ren, G., Qin, C.-Z., & Xiao, W. (2018). Validity of historical volunteered geographic information: Evaluating citizen data for mapping historical geographic phenomena. *Transactions in GIS, 22*, 149–164. https://doi.org/10.1111/tgis.12300.
Zhao, Q., Myint, S., Wentz, E., & Fan, C. (2015). Rooftop surface temperature analysis in an urban residential environment. *Remote Sensing, 7*, 12135–12159. https://doi.org/10.3390/rs70912135.

Contribution à la cartographie multirisques de territoires côtiers : approche quantitative des conséquences potentielles et des concomitances hydrologiques (Normandie, France)

Les environnements côtiers en Normandie sont propices à de multiples aléas (érosion, submersion marine, inondation par débordement de cours d'eau ou remontée de nappe, crue turbide par ruissellement, mouvement de versant côtier ou continental). Des interactions entre aléas vont se produire au sein des versants et des vallées où les populations côtières et leurs activités tendent à se densifier depuis le XIXe siècle. Dans ce contexte, il s'avère nécessaire, d'adopter une démarche multi-aléas et multirisques tenant compte de la concomitance spatiale ou temporelle de plusieurs aléas et de leurs possibles effets en cascades et d'évaluer les impacts multisectoriels engendrés par ces aléas.

Dans le cadre de cette thèse, ainsi que dans le programme ANR RICOCHET, trois sites d'étude ont été sélectionnés à l'embouchure des rivières littorales : de Auberville à Pennedepie, de Quiberville à Dieppe et de Criel-sur-Mer à Ault en raison d'importants enjeux socio-économiques et de fortes interactions entre les phénomènes hydrologiques et gravitaires. Deux principaux objectifs ont été menés à bien : (1) un développement méthodologique sur les analyses des **conséquences potentielles** en considérant les éléments exposés au sein d'un territoire d'étude à travers une approche multiscalaire ; (2) la mise en évidence et la quantification **des effets des concomitances hydrologiques** (lame d'eau et extension spatiale) liés aux blocages des écoulements fluviaux par la mer dans les embouchures à partir d'une analyse spatiale et d'une modélisation hydraulique sous HEC RAS.

Mots clés (indexation rameau) : *Risques naturels, Hydrologie, Littoraux-modifications-France, Habitat urbain, SIG.*

Mots clés (indexation libre) : *éléments à risque, conséquences potentielles, concomitance hydrologique, modélisation hydraulique, régression linéaire multiple, SIG.*

Contribution to multirisk mapping of coastal territories: quantitative approach to potential consequences and hydrological concomitances (Normandy, France)

The coastal environment in Normandy is conducive to a convergence of multiple hazards (erosion, marine submersion, flooding by overflowing streams or upwelling of a water table, turbid flooding by runoff, coastal or continental slope movement). Because of their interface positions, important regressive dynamics go between the marine and continental processes. This interaction will occur within the slopes and valleys where coastal populations and their activities have tended to become more densified since the 19th century. In this context, it is necessary to adopt a multi-hazard and multi-risk approach considering the spatial or temporal confluence of several hazards and their possible cascading effects and to assess the multi-sector impacts generated. by these vagaries.

As part of this thesis, as well as in the ANR RICOCHET program, three study sites were selected at the outlet of the coastal rivers: from Auberville to Pennedepie, from Quiberville to Dieppe and from Criel-sur-Mer to Ault due to significant issues and strong interactions between hydrological and gravitational phenomena. Two main objectives have been carried out: (1) an methodological development on analyses of potential consequences by considering all the elements at risk within a study territory through a multiscaling approach; (2) an analysis of hydrological concomitances through a both statistical and spatial approach.

Keywords: *Potential consequences, Hydrological concomitant, Hydraulic modeling, GIS.*

Discipline : *Géographie physique*

Laboratoires :
LETG-Caen – UMR 6554 CNRS
Esplanade de la Paix.
14032 Caen Cedex, France

M2C-Rouen – UMR 6143 CNRS
Place Emile Blondel
76821 Mont Saint Aignan cedex, France

Kevin Graff (2020)