



HAL
open science

L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisations et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables

Antonin Montané

► **To cite this version:**

Antonin Montané. L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisations et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2014. Français. NNT : 2014MON30014 . tel-01077926

HAL Id: tel-01077926

<https://theses.hal.science/tel-01077926>

Submitted on 30 Jun 2015

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par l'Université Paul Valéry-Montpellier 3
Arts, Lettres, Langues, Sciences Humaines et Sociales

Préparée au sein de l'école doctorale 60
Territoires, Temps, Société et Développement
Et de l'unité de recherche UMR GRED

Spécialité : Géographie (section CNU 23)

Présentée par Antonin Montané

L'approche hydrogéomorphologique :
pratiques, valorisations et développement
d'une méthode de cartographie
des zones inondables

Soutenue le 04 juillet 20140 devant le jury composé de

Emmanuèle Gautier-Costard, Professeur, Université Paris 1 - Sorbonne
(Rapporteur)

Pierre-Gil Salvador, Professeur, Université Lille 1 (Rapporteur)

Patrick Pigeon, Professeur, Université de Savoie

José-Luis Delgado, Chef du service RILH, CETE Méditerranée

Olivier Vento, Directeur de projet, BURGEAP

Thomas Buffin-Bélangier, Professeur, Université du Québec à Rimouski (co-
directeur)

Freddy Vinet, Professeur, Université Montpellier 3 (co-directeur)

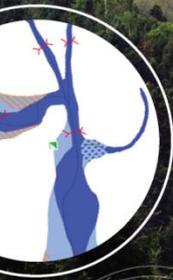


Université Paul Valéry - Montpellier 3
École Doctorale 60 - Territoires, Temps, Sociétés et Développement
Spécialité : Géographie (section CNU 23)

THESE DE DOCTORAT
Présentée et soutenue publiquement le 04 juillet 2014

Antonin MONTANÉ

L'approche hydrogéomorphologique :
pratiques, valorisations et développement d'une méthode
de cartographie des zones inondables



*Sous la direction de Freddy Vinet et de
Thomas Buffin-Bélanger*

Membres du Jury

Emmanuèle Gautier-Costard, Professeur, Université Paris 1 - Sorbonne (Rapporteur)

Pierre-Gil Salvador, Professeur, Université Lille 1 (*Rapporteur*)

Patrick Pigeon, Professeur, Université de Savoie

José-Luis Delgado, Chef du Service Risques Inondations, Littoraux et Hydrauliques, CEREMA

Olivier Vento, Directeur de projets, BURGEAP

Thomas Buffin-Bélanger, Professeur, Université du Québec à Rimouski (*Co-directeur*)

Freddy Vinet, Professeur, Université Montpellier 3 (*Co-directeur*)

Remerciements

La rédaction de ce manuscrit est l'aboutissement de trois années de recherche menées à l'Université Montpellier 3 et au sein de la société BURGEAP. Je tiens ici à exprimer toute ma gratitude et ma sincère reconnaissance envers toutes les personnes qui m'ont apporté soutiens et encouragements au cours de ce périlleux travail.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à mes co-directeurs, Freddy Vinet, et Thomas Buffin-Belanger. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont accordée dès le début de ce travail. Je les remercie aussi pour leur encadrement et les remarques qu'ils m'ont adressées tout au long de la thèse et en particulier lors de la période de rédaction.

Je tiens également à remercier Olivier Vento. Depuis mon stage de Master 2 jusqu'à l'aboutissement de ce travail de thèse, il m'a toujours conseillé et soutenu, tant sur des aspects techniques que pour l'obtention de mon contrat CIFRE. Je le remercie également d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie Emmanuelle Gautier et Pierre-Gil Salvador qui me font l'honneur d'être rapporteur de cette thèse. Je voudrais exprimer ma gratitude à Patrick Pigeon et José-Luis Delgado d'avoir accepté de compléter le jury et d'avoir évalué ce travail.

Je voudrais ensuite remercier les institutions et les personnes qui ont contribué à financer ce travail de recherche. Je remercie tout d'abord la société BURGEAP pour avoir financé en grande partie mon travail. Je remercie en particulier Jean-Marie Côme, directeur de la R&D de BURGEAP pour m'avoir soutenu et conseillé durant ces trois années. Je remercie également l'ANRT pour avoir accepté de cofinancer cette thèse via l'attribution du contrat CIFRE. Je remercie l'UMR GRED pour avoir participé à mes frais de déplacements. Je remercie l'UQAR et le consortium OURANOS qui ont contribué à financer ces travaux. Enfin, je voudrais remercier le MEDDE, le MSP et la DREAL Lorraine qui grâce à différents contrats signés avec BURGEAP m'ont permis d'étoffer mon travail.

Cette recherche n'aurait pas pu aboutir sans les échanges et le soutien de plusieurs personnes. En espérant n'oublier personne, je voudrais exprimer toute ma gratitude :

- à Jean-Philippe ChereL, pour le temps qu'il m'a accordé afin de mieux utiliser ArcGIS et d'y voir plus clair dans les données LiDAR ;
- aux membres du CETE Méditerranée, Frédéric Pons et Christophe Esposito pour leurs échanges sur le LiDAR, la Directive Inondation et la cartographie hydrogéomorphologique ;
- à Gérald Garry, Fabrice Daly, Alice Néron, et Sabine Baillarguet (MEDDE) pour les précieux échanges liés à la réalisation du MNZI et à la mise en place de la Directive Inondation ;
- aux membres de l'UMR GRED pour les interactions positives et stimulantes liées à ce travail de thèse. Je remercie en particulier Annabelle Moatty pour le temps qu'elle a accordé à la relecture du manuscrit. Je tiens également à remercier Monique Gherardi qui m'a été d'une aide précieuse pour régler les nombreux aspects administratifs que recèle la réalisation d'une thèse ;

- à Hubert Clapet, de la DREAL Basse-Normandie, pour avoir pris le temps d'échanger avec moi sur la production d'AZI et sur la cartographie hydrogéomorphologique en général dans sa région ;
- à Marcel Masson, pour les nombreux et enrichissants échanges que nous avons eu au sujet de la cartographie hydrogéomorphologique et de son possible développement ;
- aux 42 employés de DREAL et de DDT qui ont accepté de répondre de manière assidue aux questionnaires envoyés par internet, me fournissant ainsi des informations primordiales pour comprendre la place de la cartographie hydrogéomorphologique en France ;
- aux 108 personnes qui ont accepté de répondre au questionnaire en ligne portant sur la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique ;
- aux employés BURGEAP de l'agence d'Avignon et en particulier, à Cyril, François, Benoît, Camille, Axel, Louis et Jessica avec lesquels j'ai partagé le même bureau, mais également des périodes de découragement, tout comme des périodes plus joyeuses liées à ma recherche ;
- aux employés BURGEAP de l'agence de Lyon et de la R&D pour les échanges constructifs ;
- à David Bourguignon pour les nombreux échanges téléphoniques teintés d'encouragements mutuels et de débats sur les politiques de gestion du risque inondation ;
- à Franck Zangelmi pour m'avoir encadré lors de mon stage à Egis Eau et pour avoir pris le temps de répondre à certaines interrogations sur les SIG et la cartographie hydrogéomorphologique ;
- à l'ensemble des fluvios de l'UQAR, pour leur formidable accueil durant les trois étés passés avec eux. Merci à Sylvio et Taylor pour les nombreuses discussions sur la cartographie hydrogéomorphologique. Merci à JP pour m'avoir fait découvrir les « joies » du géoradar sur la Matane. Je remercie également Marie-Andrée pour son aide précieuse lors de mes expérimentations Arcgissiennes.

J'ai également une pensée pour Joëlle Salazar, mon professeur de géographie au lycée, qui m'avait vivement encouragé à entreprendre des études de géographie.

Finalement, je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements à ma famille, à ma sœur et à mes parents qui m'ont toujours encouragé dans mes études et en particulier lors de la rédaction de cette thèse. Enfin, je remercie Audrey, mon hydraulicienne préférée, qui m'a écouté, conseillé et soutenu tout le long de ce travail et dont les remarques pertinentes m'ont aidé à mener cette recherche à son terme.

« La difficulté n'est pas de comprendre les idées nouvelles, elle est d'échapper aux idées anciennes qui ont poussé leurs ramifications dans tous les recoins de l'esprit des personnes ayant reçu la même formation que la plupart d'entre nous » J. M. Keynes

Résumé

L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisations et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables

Résumé

La connaissance de l'aléa inondation est un enjeu croissant pour la gestion du risque inondation. En France, afin de répondre à la demande des pouvoirs publics de cartographier les zones inondables, la cartographie hydrogéomorphologique émerge. Cette approche naturaliste, développée durant les années 1980, se propagea dans une large partie du Sud de la France. Aujourd'hui, la cartographie hydrogéomorphologique est une méthode reconnue pour sa fiabilité, mais elle stagne en termes d'applications et de développement dans de nouveaux territoires. Afin d'améliorer la connaissance de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique dans un cadre réglementaire, une analyse de 282 PPRI a été menée. Cette analyse a permis de dégager les modalités de prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique, mais également d'émettre des hypothèses sur les raisons de leur développement. La réalisation de MNZI (Modèle Numériques de Zones Inondables) sur des cours d'eau français et canadiens, a permis de mettre en avant l'adaptabilité de la cartographie hydrogéomorphologique à des contextes physiques différents, mais aussi d'apporter une réponse à la demande de prise en compte de cartographie de crue extrême de la Directive Inondation. L'évolution cartographique proposée dans ce travail comprend une réflexion autour de la légende des AZI, mais aussi sur le concept de cartographie positive. A travers les aspects cartographiques, réglementaires et géomorphologiques abordés, nous finissons par proposer un modèle de développement de la cartographie hydrogéomorphologique.

Mots clés : Inondation, Risque, PPR, Géomorphologie, Crue extrême, LiDAR, France, Québec

Hydrogeomorphological approach: practices, valuations and development of a floodplain mapping method

Abstract:

Flood hazard knowledge is increasingly becoming critical in flood risk management. The hydrogeomorphological mapping emerged in France, aiming to provide authorities with floodplain cartography. That naturalistic approach, developed in the 1980 decade, spread through the South of France. Today, the hydrogeomorphological mapping is widely recognized for its reliability. Though, it stagnates in terms of applications and development in new territories. The analysis of 282 PPRI (Flood Risk Prevention Plans) was performed in order to assess the extent of usage of hydrogeomorphological mapping in flood risk regulatory framework. That analysis highlighted how hydrogeomorphological mapping is used in the French flood risk management. NMFP (Numerical Model of Floodplain) production on French and Canadian rivers showed how the hydrogeomorphological interpretation could be adaptable to different physical contexts. It also answers to the European "Floods Directive" that asks for an extreme flood mapping. The cartographic evolution proposed in this research particularly includes AZI (Floodplains maps) legend simplification. It also makes proposals on a flood risk "positive mapping" of. Through cartographic, regulatory and geomorphologic aspects, this research finally proposes a development model applicable to hydrogeomorphological mapping.

Key words: Flood, Risk, PPR, Geomorphology, Extreme flood, LiDAR, France, Quebec

Sommaire

Sommaire	9
Introduction générale	11
Chapitre 1 - L'approche hydrogéomorphologique, une méthode de cartographie des zones inondables.....	17
1.1 Les grands concepts de la géomorphologie : fondements de la cartographie hydrogéomorphologique	18
1.2 Développement institutionnel de la cartographie hydrogéomorphologique.....	21
1.3 Les principes de la cartographie hydrogéomorphologique en France	28
1.4 L'hydrogéomorphologie dans la pratique.....	34
1.5 Conclusions	42
Chapitre 2 - Évaluation de la place de la cartographie hydrogéomorphologique dans la gestion du risque inondation en France	45
2.1 La représentation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les services instructeurs	46
2.2 Les liens entre les AZI hydrogéomorphologiques et les PPRI	53
2.3 Analyse des PPRI et de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique	59
2.4 Conclusions	95
Chapitre 3 - Le MNZI, un renouvellement efficace de la cartographie hydrogéomorphologique	97
3.1 Le MNZI : définition, réalisation et valorisation potentielle.....	99
3.2 Sites d'étude	114
3.3 Réalisation de MNZI.....	124
3.4 Mise en pratique du MNZI	149
3.5 Discussion	154
3.6 Conclusions	159
Chapitre 4 - Application de la cartographie hydrogéomorphologique : imprécisions, incertitudes et niveau de confiance en fonction des environnements fluviaux	161
4.1 Exemples d'environnements complexes pour la réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques	162
4.2 Imprécisions et incertitudes dans la cartographie hydrogéomorphologique	169
4.3 Le niveau de confiance : une combinaison des imprécisions et des incertitudes	172
4.4 Conclusions	175

Chapitre 5 - Axes de réflexion pour l'évolution de la cartographie hydrogéomorphologique	177
5.1 La simplification des AZI par approche hydrogéomorphologique : vecteur d'adhésion à la méthode ?.....	178
5.2 La « cartographie positive » : une mise en valeur de l'interprétation hydrogéomorphologique	197
5.3 Conclusions	208
Chapitre 6 - Conditions et modalités du développement de la cartographie hydrogéomorphologique	211
6.1 Les conditions du développement de la cartographie hydrogéomorphologique ..	212
6.2 Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique en France	218
6.3 Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique dans de nouveaux contextes environnementaux et règlementaires : l'exemple du Québec.....	220
Conclusion générale	229
Références bibliographiques.....	239
Liste des sigles et abréviations	251
Liste des figures, photographies et tableaux	253
Annexes	259
Table des matières.....	275



Introduction générale

La connaissance et la cartographie de l'aléa inondation apparaît comme une nécessité dans des sociétés où les inondations deviennent une préoccupation croissante. La « Directive Inondation¹ » illustre ce besoin de connaissance du risque inondation et en particulier des événements extrêmes. Cet intérêt pour les informations relatives au risque inondation sont multiples. Tout d'abord, l'augmentation de l'exposition, de la valeur des enjeux et de la fréquence des événements extrêmes amplifie l'impact de cet aléa sur les sociétés humaines (Laganier et Scarwell, 2003). Ensuite, les sociétés humaines acceptent plus difficilement la fatalité liée aux catastrophes naturelles. Ce phénomène est relié à l'accroissement de la rationalisation du risque, qui accompagne le développement des sociétés industrielles (Beck, 2001). Comme le montre Alcántara-Ayala (2002), durant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, le nombre de personnes concernées par les catastrophes naturelles a augmenté, en relation avec l'augmentation de la population mondiale, tandis que le nombre de personnes tuées est resté stable. Cette stabilité s'explique par une baisse de la vulnérabilité des enjeux et une amélioration de la prévision des crues.

Depuis la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, la prévention du risque inondation en France s'articule autour d'événements extrêmes. Fruit de la volonté de gestionnaires de prendre en compte des crues de plus en plus rares, la crue centennale, constitue encore une référence. En France, un courant de la géographie physique se concentre sur le fonctionnement des cours d'eau et dans une optique opérationnelle développe la cartographie hydrogéomorphologique. Mais cette approche reste un récente dans l'histoire de la gestion du risque inondation en France, largement dominée par l'ingénierie hydraulique. La place qu'occupe la cartographie hydrogéomorphologique dans la connaissance et la gestion du risque inondation en France et ses évolutions potentielles constituent l'objet central de la recherche entreprise.

La cartographie hydrogéomorphologique est une méthode de cartographie des zones inondables par reconstitution du fonctionnement de l'hydrosystème. Elle repose sur l'étude des lits fluviaux qui constituent la plaine alluviale. Les fondements de cette méthode s'inscrivent dans les théories telles que le système fluvial (Schumm, 1977), la classification des plaines alluviales (Nanson et Croke, 1992) ou encore les observations de Jean Tricart (1960) sur les types de lits fluviaux. La cartographie hydrogéomorphologique connaît un essor au cours des années 2000 en France par la réalisation de nombreux Atlas de Zones Inondables (AZI) et son utilisation dans des Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI). Depuis une vingtaine d'années, elle a pu conforter un corpus de connaissances et de méthodes fondées sur des concepts spécifiques qui en font une théorie cohérente pour délimiter les zones inondables à travers l'analyse de l'hydrosystème.

Les recherches traitant de la cartographie hydrogéomorphologique ont montré les avantages de la méthode tels que le faible coût de réalisation, la rapidité d'exécution ou la vision maximisée des zones inondables (Masson *et al.*, 1996). Elles ont également permis d'établir sa pertinence pour la cartographie des crues extrêmes à travers des comparaisons avec des crues historiques telles que l'Ouvèze en 1992 (Masson, 1993), l'Aude en 1999 (Chave, 2003; Garry *et al.*, 2002) ou encore les Gardons en 2002 (Ballais, 2006). Les guides techniques apportent les connaissances nécessaires à la réalisation d'AZI hydrogéomorphologiques. D'autre part, la circulaire de 2004 (METLTM et MEDD,

¹ Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Journal officiel de l'Union européenne du 06/11/2007.

2004) demande à ce que les départements du Midi méditerranéen intègrent l'hydrogéomorphologie dans leurs PPRI (Plan de Prévention des Risques d'Inondation).

La cartographie hydrogéomorphologique se développe aisément en France pour permettre la cartographie des zones inondables. Mais certains de ses aspects constituent un frein à son développement. Tout d'abord, l'absence de quantification de l'aléa et surtout l'absence de cote de crue sont une limite fondamentale, notamment pour l'utilisation dans le cadre de PPRI. Ensuite, d'aucuns précisent que la pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique se limite aux cours d'eau « méditerranéens ». Cette vision, influencée par la localisation dans le Sud de la France de la majorité des cartographies hydrogéomorphologiques, nuit à la diffusion nationale de la méthode. Notons également que la communication auprès du grand public peut être difficile en raison de termes « trop géomorphologiques » qui ne permettent pas de rendre compte efficacement du phénomène d'inondation.

Il est difficile d'évaluer la place qu'occupe la cartographie hydrogéomorphologique dans la connaissance et la gestion des inondations en France. Du côté des gestionnaires, des valorisations existent, mais ne font pas l'objet de communications. Quant à la recherche portant sur la cartographie hydrogéomorphologique, elle présente souvent des aspects techniques liés notamment à la pertinence de la méthode pour cartographier les zones inondables. Mais les modalités de prise en compte dans les documents règlementaires tels que les PPRI ne sont pas abordées.

◆ Objectifs de recherche

Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique stagne, principalement en raison d'un manque d'opérationnalité de l'approche et de communication autour des pratiques existantes. Dans une optique de développement de la cartographie hydrogéomorphologique, nous proposons de revisiter cette méthode de cartographie des zones inondables à travers une réflexion transversale. Afin de fournir des arguments en faveur du développement de la cartographie hydrogéomorphologique, plusieurs objectifs de recherche doivent être envisagés.

Le développement de l'approche hydrogéomorphologique demande une connaissance de sa compatibilité avec les documents de planification urbaine. Le premier objectif consiste à définir les utilisations règlementaires de la cartographie hydrogéomorphologique en France, dans les PPRI.

L'adhésion et la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique doivent être évaluées. Cela constitue un préalable indispensable à l'identification de potentielles évolutions cartographiques.

Nous devons également proposer des solutions pour que la cartographie hydrogéomorphologique puisse s'adapter à deux évolutions règlementaires et techniques majeures : la « Directive Inondation » et l'essor des MNT LiDAR (*light detection and ranging*). Nous devons en particulier chercher dans quelle mesure la « crue extrême » peut être associée à la zone inondable définie par approche hydrogéomorphologique.

Pour se développer, la cartographie hydrogéomorphologique doit se défaire de son étiquette « méditerranéenne ». Une analyse du niveau de confiance accordé à une cartographie hydrogéomorphologique doit permettre d'identifier précisément les paramètres qui influencent les incertitudes et les imprécisions liées à sa réalisation.

La cartographie hydrogéomorphologique doit se diversifier. Dans cette perspective, nous chercherons en particulier à faire évoluer la méthode sur le plan cartographique. Ces évolutions s'inscrivent en particulier dans la volonté d'améliorer son utilisation pour la communication sur l'aléa inondation et pour l'aménagement du territoire. La méthodologie du MNZI (Modèle Numérique de Zones Inondables) et la simplification des AZI (Atlas de Zones Inondables), présentées dans cette thèse illustrent cette volonté d'évolution de la méthode.

Le dernier objectif consiste à identifier les étapes indispensables au développement de la cartographie hydrogéomorphologique dans un territoire. Ce processus de développement devra en particulier mettre en perspective les précédents résultats et ainsi montrer l'intérêt d'une vision transversale.

◆ Structure de la thèse

Le cadre géographique de la thèse s'étend sur la France et le Québec. Les méthodologies différentes et les changements d'échelle rendent plus pertinent le fait de nous y attarder lors de la description du contenu de chaque chapitre.

La Figure 1 illustre la démarche de la thèse. Après un état de l'art de la cartographie hydrogéomorphologique présenté dans le premier chapitre, nous répondons aux hypothèses de la thèse en développant 4 chapitres. Les quatre chapitres servent à étendre cette vision transversale, à travers des axes de réflexion règlementaires, cartographiques et géomorphologiques. Le sixième et dernier chapitre relie les trois axes de la vision transversale en proposant un modèle de développement institutionnel de l'approche hydrogéomorphologique.

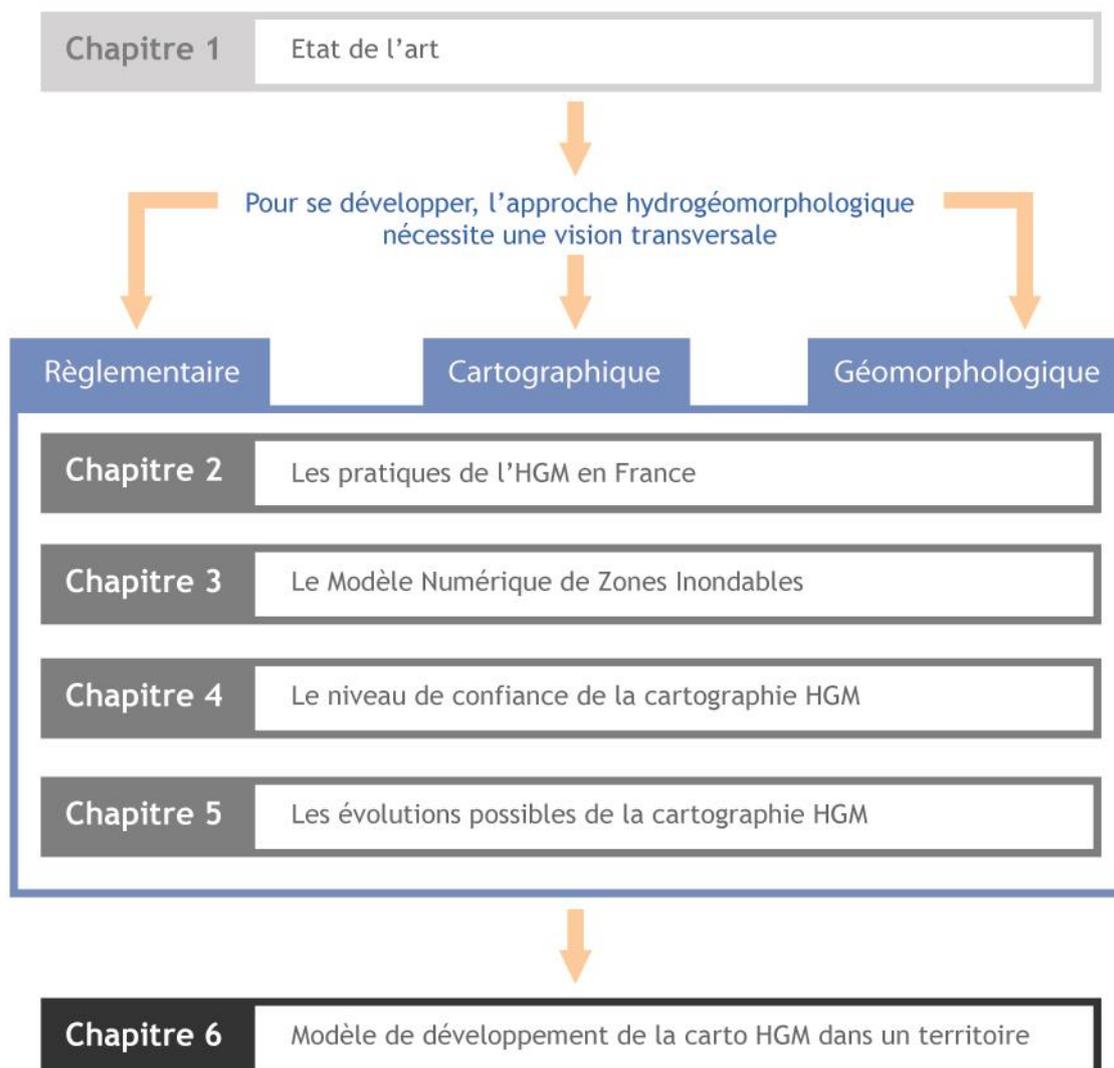


Figure 1 : Schématisation du plan de la thèse

Le premier chapitre définit les principales caractéristiques de la cartographie hydrogéomorphologique, tant sur le plan des fondements scientifiques, des méthodes employées que des perspectives d'évolution à apporter.

Le second chapitre établit un état des lieux de l'utilisation réglementaire de la cartographie hydrogéomorphologique en France. L'analyse de sa représentation par les services techniques de l'Etat est réalisée grâce à des questionnaires. L'analyse de PPRI met en avant des logiques spatiales et temporelles et cherche à apporter une vision synthétique de pratiques locales. L'interprétation des résultats issus de l'analyse des PPRI est réalisée grâce à des statistiques multivariées. Elle est mise en valeur au moyen de cartographies réalisées à l'échelle de la France.

Le troisième chapitre détaille la réalisation de MNZI (Modèles Numériques de Zones Inondables). On dénombre six sites d'étude, dont quatre en France et deux au Québec. La disponibilité de MNT LiDAR et leur manipulation dans des logiciels de SIG (Système d'Information Géographique) tels que

ArcGIS (utilisé dans le cadre de cette thèse), mais aussi Qgis, permettent la réalisation de MNZI. A travers les sites d'études de la Meurthe et des rivières québécoises, nous évaluons les problématiques liées à l'interprétation hydrogéomorphologique hors du contexte méditerranéen. Enfin, la question de la compatibilité entre la crue extrême de la « Directive Inondation » et du MNZI y tient une place prépondérante.

Le quatrième chapitre présente une analyse sur le niveau de confiance accordé à une cartographie hydrogéomorphologique. En nous appuyant sur les sites d'études déjà présentés dans le chapitre 3, nous détaillons les paramètres naturels et anthropiques qui influencent les deux composantes du niveau de confiance : les imprécisions et les incertitudes.

Le cinquième chapitre présente des évolutions possibles de la cartographie hydrogéomorphologique. Les évolutions proposées s'appuient en premier lieu sur une analyse de la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique. L'analyse de la compréhension est menée grâce à des questionnaires envoyés à des personnes non expertes. Les AZI par approche hydrogéomorphologique tels qu'ils sont pratiqués dans le milieu méditerranéen peuvent évoluer. Après une analyse des points faibles de la cartographie, nous proposons une forme simplifiée d'AZI orientée vers la communication sur l'aléa inondation et son utilisation réglementaire. Dans une perspective d'aménagement du territoire, nous chercherons de quelle manière l'interprétation hydrogéomorphologique peut être mise en valeur. Cette expérience s'appuie sur l'exemple de la rivière Matane, au Québec.

Le sixième chapitre constitue une synthèse des différents points abordés. Il propose un modèle de développement de l'approche hydrogéomorphologique dans un territoire. En s'appuyant sur ce modèle, nous évaluerons le développement de la cartographie hydrogéomorphologique au Québec et en France. Puis nous identifierons les perspectives les plus probantes de développement de l'hydrogéomorphologie dans chaque politique de gestion du risque d'inondation.



Chapitre 1

L'approche hydrogéomorphologique, une méthode de cartographie des zones inondables

La cartographie hydrogéomorphologique a pris son essor à la fin des années 1990, mais elle repose sur un socle de connaissances des hydrosystèmes élaboré dès les années 1960 par les géomorphologues français et anglo-saxons. La méthode a acquis une légitimité en s'appuyant également sur un corpus technique de guides méthodologiques mis en place par les services techniques de l'État français, mais aussi un ensemble de circulaires et des textes de lois qui favorisent le développement de la méthode. Dans ce chapitre, nous définissons les concepts structurant l'approche hydrogéomorphologique, ainsi que les grandes étapes de son émergence en montrant comment elle puise ses fondements dans la culture géomorphologique, mais aussi comment elle répond à des exigences pratiques en termes de prévention des risques. On a clairement dans la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables, un exemple d'application des préceptes de la géomorphologie à des fins gestionnaires. Cela participe à la solidité de la méthode, mais également à ses limites.

1.1 Les grands concepts de la géomorphologie : fondements de la cartographie hydrogéomorphologique

1.1.1 Définition

La géomorphologie (du grec *gê*, terre ; *morphê*, forme ; *logos*, discours) est la science qui a pour objet la description et l'explication du relief terrestre. Le géomorphologue est amené pour mener à bien son travail, à s'intéresser à d'autres sciences, telles que la géologie, la pédologie, l'hydrologie ou la biologie (Coque, 2002). Au même titre que la géographie, la géomorphologie constitue une science de synthèse. Elle se situe à l'interface d'autres sciences, avec pour originalité de concevoir la carte comme l'aboutissement de la réflexion (Guermond, 1988) ; représenter des phénomènes dans l'espace constitue le cœur de la réflexion.

1.1.2 Du cycle d'érosion aux types de lits fluviaux

La relation entre la forme des vallées et l'action des cours d'eau fut mise en évidence avant le développement de la géomorphologie, notamment grâce à des savants grecs de l'antiquité, tels qu'Aristote ou Ptolémée (Coque, 2002). Mais ce n'est qu'en 1899 que l'américain W. M. Davis établit la théorie du cycle d'érosion à la base de l'étude des hydrosystèmes fluviaux (Ballais *et al.*, 2011). Pour Davis, l'évolution du relief connaît trois stades : les stades de jeunesse, de maturité et de vieillesse (Coque, 2002). Un cycle débute après qu'une phase d'orogénèse ait produit un volume de relief sur lequel des processus d'érosion agissent jusqu'à la disparition du volume (Coque, 2002; Derruau, 1974).

Au cours du XX^{ème} siècle, des critiques émergent au sujet de cette théorie, lui reprochant notamment l'absence de prise en compte d'éventuels rajeunissements tectoniques durant le cycle d'érosion (Derruau, 1974). La géomorphologie fluviale se développa désormais autour d'un courant

quantitativiste et dynamique (Bravard et Petit, 1997). Ce courant trouva en particulier sa source dans les travaux de Horton (1945), qui introduit l'étude et l'analyse quantitative des bassins versant et de leur réseau hydrographique. La publication de *Fluvial Processes in Geomorphology* (Leopold *et al.*, 1964) formalisa les relations entre la géométrie hydraulique des cours d'eau et leurs processus. Schumm (1977) propose de découper le système fluvial en trois zones réparties d'amont en aval (Figure 2). Le système est régulé par des variables de contrôle (débits liquides et solides), elles-mêmes soumises à l'influence du climat.

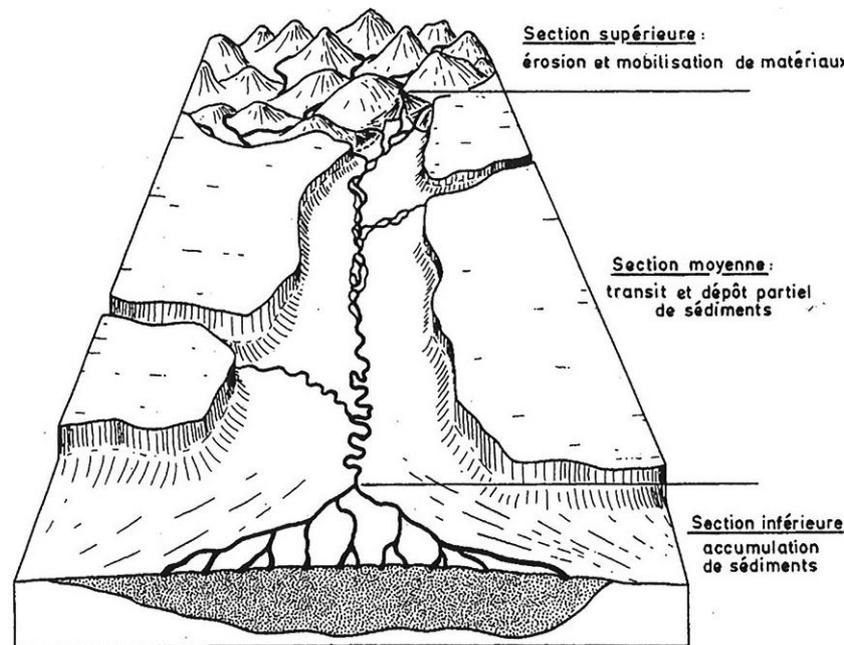


Figure 2 : Schéma du Système fluvial (source Campy et Macaire, 1989)

En 1992, Nanson et Croke définissent le lit majeur (*floodplain*) comme « une large surface alluviale séparée du cours d'eau par un talus et construit de sédiments transportés par le régime fluvial actuel ». En plus d'apporter une définition précise de la *floodplain*, Nanson et Croke proposent une classification des types de plaines alluviales. Cette classification dépend de différents paramètres tels que la puissance spécifique (exprimée en $W.m^{-2}$), le type de sédiment (grossier, fin...) ou encore le style fluvial (Leopold et Wolman, 1957). Cette classification des plaines alluviales s'inscrit dans la continuité du concept de système fluvial (Schumm, 1977) puisqu'il propose d'envisager la diversité des plaines alluviales.

Marqué par les effets géomorphologiques de la crue du Guil en 1957 (Alpes françaises), Jean Tricart (1958) amorce une réflexion autour de l'étude des différents lits constituant la plaine alluviale. Cette réflexion est encore approfondie en 1960 lorsqu'il publie *Les types de lits fluviaux* où il propose une classification des lits fluviaux en fonction de leur morphologie, de leur végétation associée ou encore de leur type de sédiments. En plus de cette classification, l'auteur insiste sur « l'intérêt primordial » qu'elle représente pour la gestion du risque inondation en précisant que « leur étude devrait être à la base de toute tentative d'aménagement [...] ». L'auteur insiste sur ce qu'il considère comme le

fondement de l'approche, à savoir l'observation et l'interprétation du terrain, que « des ingénieurs pressés » avaient tendance à remplacer par des calculs. Les travaux de Tricart sont alimentés par la volonté de donner à la géomorphologie un aspect pratique, indispensable à son essor et à sa diversification méthodologique (Mainguet, 2003).

Les années 1950 et 1960 sont également caractérisées par le développement de la cartographie géomorphologique sous la houlette de Tricart (1956) ou encore de Joly (1962). Ces cartographies ont pour objectif de produire une « représentation qualitative, quantitative et explicative » du relief de la Terre (Joly, 1965). Cette représentation est envisagée à travers l'analyse des formations superficielles et des vallées responsables de leur façonnement. Elle participe ainsi aux réflexions liées à l'aménagement du territoire (Dewolf, 1981; Tricart, 1973). La cartographie géomorphologique ne montre pas pour autant d'applications pratiques, même si elle devient progressivement l'élément central de mise en valeur de l'interprétation géomorphologique.

Les différentes formations superficielles et les roches apparentes sont différenciées par des figurés surfaciques. Les ruptures de pente et les processus apparaissent sous forme de figurés linéaires ou ponctuels (Tricart, 1965). Cette méthode de cartographie est largement reprise par les géomorphologues, en particulier pour les environnements montagnards présentant des fortes dynamiques (Figure 3) ou encore pour la mise en valeur des géomorphosites (Reynard et Panizza, 2005).

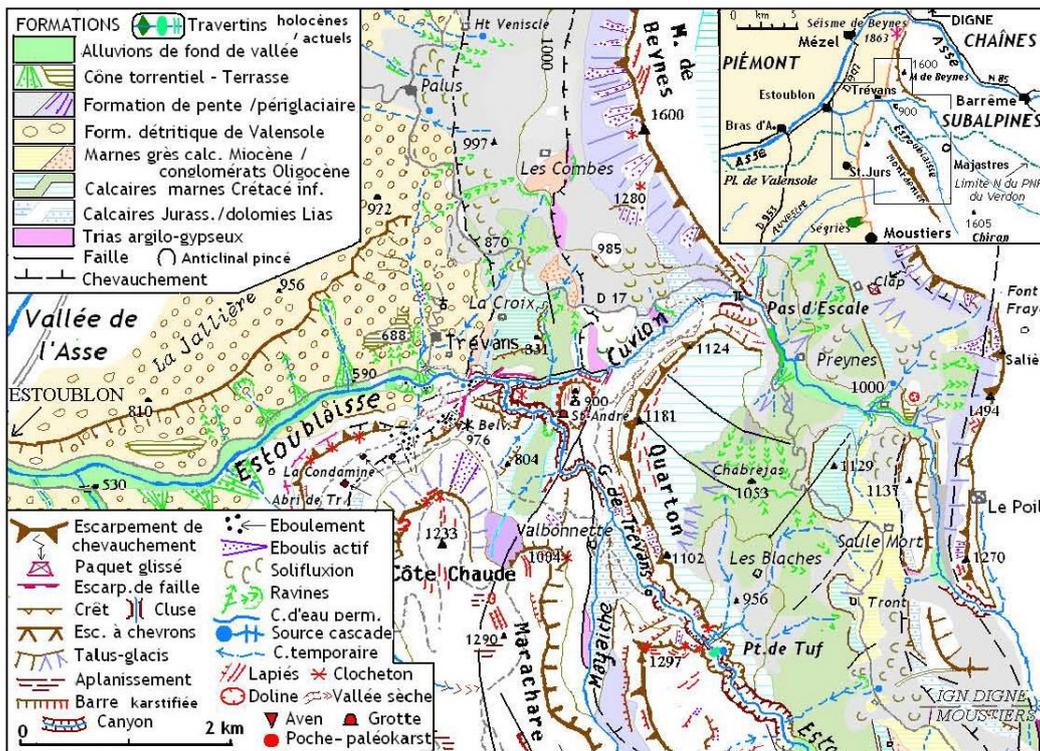


Figure 3 : Carte géomorphologique des Gorges de Trévan, dans les Alpes. (Nicod, 2011)

La cartographie hydrogéomorphologique correspond à une adaptation des méthodes développées pour la cartographie géomorphologique. Elle se distingue car elle est centrée sur la plaine alluviale active et

les processus d'inondation qui la façonnent. Les bases de la cartographie hydrogéomorphologique étaient lancées : une analyse géomorphologique au service des sociétés humaines.

1.2 Développement institutionnel de la cartographie hydrogéomorphologique

1.2.1 De la lutte contre les inondations à la cartographie de l'aléa

1.2.1.1 Maitriser la nature

Dans les pays occidentaux, la « révolution industrielle » du XIX^{ème} siècle marque le passage d'une société artisanale et agricole à une société commerciale et industrielle où la rationalité et la technique jouent un rôle moteur (Verley, 1997). Le géographe Elisée Reclus est un témoin privilégié de ces changements d'idéologie à travers ses récits de voyage, notamment en Amérique du Nord. Reclus identifie plusieurs logiques concernant le fonctionnement des cours d'eau, telles que le rôle joué par la sinuosité du Mississippi ou par l'érosion des berges. Celui-ci, fortement conditionné par les travaux de rectification menés par des ingénieurs États-Uniens, considère que la finalité de la compréhension de la nature est de pouvoir la maîtriser pour offrir aux sociétés humaines des meilleures conditions de vie (Le Lay, 2008). Ainsi illustre-t-il de manière parfois poétique, sa foi pour le progrès technique (Reclus, 1859) :

« Ces forêts profondes où l'on respire la mort avec l'humide parfum des plantes doivent être assainies, ces marécages d'où s'exhale une fiévreuse atmosphère doivent être comblés, ce fleuve menaçant dont le planteur regarde avec inquiétude le courant rapide doit être muselé. Il faut que bientôt le doigt de l'homme puisse guider le Mississippi et le faire serpenter à sa guise à travers le continent comme un précieux auxiliaire, et non plus comme un ennemi. »

1.2.1.2 La lutte contre les inondations

Le XIX^{ème} siècle est marqué par le progrès technique et l'amélioration de la compréhension des phénomènes physiques, notamment en hydraulique et en hydrologie (Tarlock, 2012). Les sociétés humaines considèrent qu'elles ont la possibilité de réduire, voire d'éradiquer les inondations en agissant directement sur les processus physiques (Veyret et Reghezza-Zitt, 2006). En France la gestion du risque inondation fut fortement influencée par les inondations de 1856 qui justifiaient de nombreux travaux (digues, barrages) visant à protéger les enjeux (Bethemont, 2007). Ces travaux, menés par les ingénieurs des Ponts et Chaussées sont le résultat du traitement de l'inondation comme un problème à résoudre. Ils ne voient donc pas l'intérêt de cartographier l'aléa (Le Bourhis, 2007). Freddy Vinet (2010) met en avant la relation entre le niveau de développement d'une société et sa volonté de maîtriser les risques. La logique « naturo-centrée » comporte une réponse logique aux inondations avec la construction de digues et autres ouvrages hydrauliques (Cœur *et al.*, 2002). Dans cette vision

très militarisée de l'aléa naturel considéré comme un ennemi à combattre, la cartographie, bien que présente, n'était pas un outil central (Scarwell et Laganier, 2004). La seule solution logique était nécessairement de tenter de modifier l'aléa en s'appuyant sur le progrès technique.

La lutte contre les inondations par la construction d'ouvrages hydrauliques lourds connaît quelques critiques au cours du XX^{ème} siècle. Le géographe américain G.F. White met en évidence dès 1945 l'impact négatif des digues du Mississippi qui augmentent l'exposition au risque. Scarwell et Laganier (2004) parlent d'une spirale du risque qui a accompagné la politique de lutte contre les inondations. Celle-ci s'est caractérisée, pour la population en zone inondable, par une diminution de la conscience du risque.

1.2.1.3 Les Plans de Surfaces Submersibles

En France, les grandes inondations du milieu du XIX^e siècle font naître l'idée que la connaissance des zones inondables est une nécessité. La représentation de l'aléa inondation débute dès 1911 avec la réalisation du premier Plan de Surfaces Submersibles (PSS) sur le Rhône à l'aval de Lyon. Le terme de PSS apparaît avec la publication du décret-loi du 30 octobre 1935 qui entraîne la réalisation de PSS jusque dans les années 1970. Ce document cartographique, réalisé par les services techniques de l'Etat est constitué de deux zones : la zone A, dite de « Grand débit » et la zone B, dite de « Débit complémentaire ».

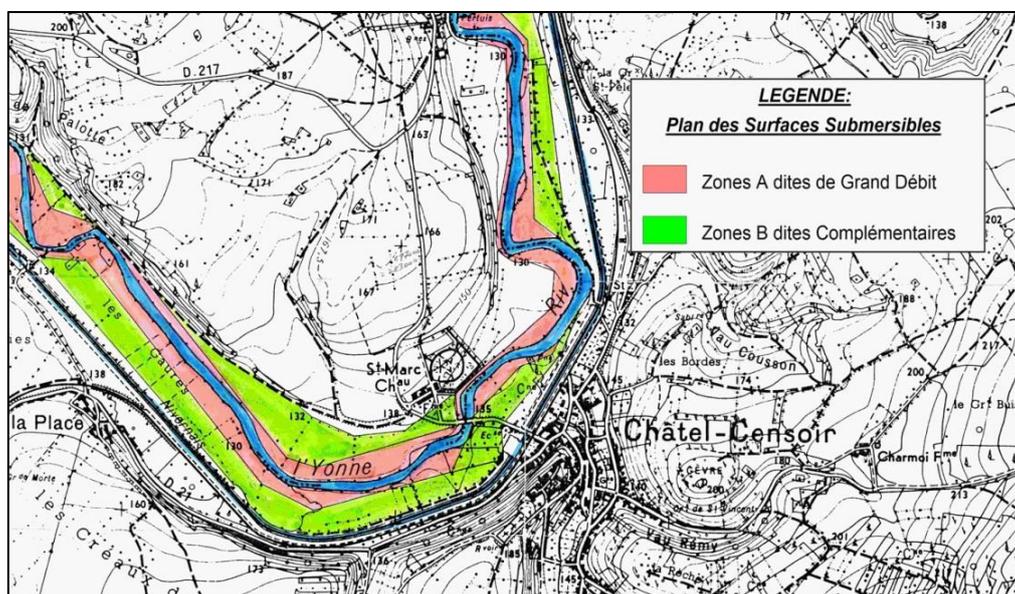


Figure 4 : Extrait du PSS de l'Yonne, approuvé par le décret du 13 janvier 1949 (source : DDT de l'Yonne)

Cependant, comme le précise un ingénieur de la DDE de l'Oise, cité par Le Bourhis et Bayet (2002) l'impact de ce zonage sur l'urbanisme reste minime. En effet, les documents sont produits « [...] par la Navigation, pour la Navigation » et ils n'ont donc pas vocation à gérer l'urbanisme en zone inondable. L'objectif du PSS est de permettre l'écoulement des eaux (Garry *et al.*, 2002) en cas de crue et le

retour à des conditions de navigation acceptables, en particulier en empêchant la construction de bâtiments qui pourraient perturber l'écoulement des eaux vers l'aval. En conséquence, seules les zones de « grand débit » étaient contraignantes en terme d'urbanisme (Le Bourhis et Bayet, 2002). De plus les inondations prises en compte pour l'élaboration des cartes ne correspondaient pas toujours aux évènements les plus importants. Par exemple, le PSS de l'Oise approuvé en 1972 repose sur la crue de 1955, alors que sur le secteur d'étude la crue de 1910 était plus forte (Le Bourhis et Bayet 2002).

1.2.1.4 Le tournant des années 1980 en France

La gestion du risque inondation connaît un tournant dans les années 1980. L'évolution de la conception du risque inondation durant les années 1970 (Veyret et Reghezza-Zitt, 2005; Vinet, 2010), avec l'introduction du concept de vulnérabilité et le remplacement de la société au cœur de la production du risque (Hewitt, 1983) est un point central.

Les inondations, comme d'autres catastrophes naturelles sont, d'un point de vue juridique, un risque non assurable par le droit commun des assurances (Collombat, 2012). Voilà pourquoi en 1982, le parlement français décide d'approuver la « loi relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles² ». Grâce à la réassurance publique de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), cette loi permet, à chaque personne qui assure son habitation ou son véhicule, d'être couverte par le « système CatNat » (Sandink *et al.*, 2010). En 1984, le décret d'application des Plans d'Exposition aux Risques (PER) entraîne la publication d'une méthodologie précise motivée par trois axes prioritaires. Ces plans doivent développer la connaissance des phénomènes, informer la population des risques encourus et permettre de maîtriser l'occupation des sols (Ballais *et al.*, 2011; Garry, 1994). Les PER constituent un échec. Cet échec est tout d'abord imputable à un manque de discussions engagées avec les élus locaux. Ensuite, l'utilisation indifférenciée de modèles hydrauliques lourds dans des zones urbaines ou dans les zones sans enjeux est dispendieuse. Enfin, le manque de vraies contraintes sur les documents d'urbanisme les rend inefficaces du point de vue de la gestion du risque d'inondation (Garry *et al.*, 2002; Le Bourhis et Bayet, 2002).

La « Circulaire relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables » du 24 janvier 1994³, sollicite les services techniques de l'Etat pour réaliser des Atlas de Zone Inondable (AZI), qui auront valeur de document de porter à connaissance. Ces documents ont la vocation d'homogénéiser les informations sur l'aléa inondation en France, grâce à la prise en compte de la crue centennale ou d'une crue historique supérieure comme aléa de référence. Il n'est pas encore question de cartographie hydrogéomorphologique. Néanmoins, la recommandation d'études à l'échelle de bassins versants et la volonté de préserver les « champs d'inondation » participent à faire émerger l'approche hydrogéomorphologique.

La loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement⁴, ou « loi Barnier », institue le Plan de Prévention des Risques (PPR) en remplacement des documents existants (PSS, PER, R111-3 du code de l'urbanisme). Au même titre que le PER, le PPRI est un document

² Loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles

³ Circulaire parue au JORF du 10 avril 1994, page 5330

⁴ Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement

règlementaire annexé au Plan Local d'Urbanisme (PLU) et vaut servitude d'utilité publique. Le PPRI est composé de plusieurs documents : un rapport de présentation, un règlement, ainsi que des documents graphiques (cartes d'aléa et cartes du zonage réglementaire). Les principes de ce document sont résumés dans un guide publié (1999) par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (METL).

Contrairement aux documents qui l'ont précédé, le PPRI se veut être le fruit d'une collaboration plus étroite entre les services de l'État et les communes. L'échelle du bassin de risque, en l'occurrence le bassin versant ou une section de cours d'eau devient privilégiée au détriment de celle de la commune. L'utilisation de données qualitatives pour la cartographie des aléas est fortement recommandée, en raison de plusieurs atouts. Elles sont « [...] peu onéreuses et rapides à exécuter », « [...] suffisantes pour comprendre le fonctionnement du milieu, évaluer les risques [...] », « [...] un préalable indispensable » à une modélisation hydraulique et « pour les enjeux, elles correspondent parfaitement à la demande de délimiter les espaces » (Garry et Graszak, 1999). La prise en compte des AZI devient de ce fait une priorité « naturelle ». De plus, la loi Barnier (1995) constitue la porte d'entrée du principe de précaution développé lors de la Déclaration de Rio 1992⁵ en et l'adapte à la sécurité des personnes.

Des années 1980 aux années 2000, l'adoption des lois citées ci-dessus coïncide avec une série d'inondations catastrophiques. Ces catastrophes marquent les esprits, comme à Nîmes en 1988, à Vaison-la-Romaine en 1992, en Bretagne en 1995, dans l'Aude en 1999 ou encore dans le Languedoc en 2002 et dans la vallée du Rhône en 2003.

Cartographier les aléas ou les zones inondables constitue la première étape de l'acceptation de l'aléa inondation. En effet, on ne cherche désormais plus à maîtriser l'aléa, mais à le spatialiser pour ensuite s'y adapter. Les PER, AZI ou PPRI reflètent la volonté de l'État français de faire de la carte la « pièce centrale d'un dispositif de contrôle des risques naturels » (Le Bourhis, 2007).

1.2.2 Émergence de la cartographie hydrogéomorphologique en France

Dès le début des années 1980, le principe de la cartographie hydrogéomorphologique qui reprend la classification des lits fluviaux de Tricart (1960) est expérimenté en France. C'est le Centre d'Études Techniques et de l'Équipement (CETE) Méditerranée qui lance les études, avec les travaux de Marcel Masson (1983) et Gérard Garry (1985), alors au Ministère de l'Équipement. Les premières expérimentations de la méthode sont des expertises ponctuelles comme celle du Buech (Alpes-de-Haute-Provence) en 1980, du Gardon d'Anduze (Gard) en 1983 ou encore le Lez (Hérault) en 1988 (CETE Méditerranée, 1988, 1986, 1981).

A cette époque, il n'est pas question de cartographie hydrogéomorphologique, mais de cartographie géomorphologique des zones inondables. Cela fait référence aux principes de la cartographie

⁵ ONU, 1992. Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement. Conférence Des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement.

géomorphologique qui représentent les formes reliées à différents processus (gravitaires, éoliens, glaciaires). Quant à la cartographie hydrogéomorphologique, elle se concentre sur les formes mises en place par des processus fluviaux en occultant les autres phénomènes. Il fut question d'utiliser cette approche dans le cadre de PER, mais les modélisations hydrauliques leurs furent préférées. La cartographie hydrogéomorphologique conserve durant les années 1980 un aspect expérimental à diffusion confidentielle.

La Figure 5 est un extrait d'une cartographie réalisée sur le Gardon d'Anduze par le CETE Méditerranée. Même si la légende évolua au cours des années suivantes, on retrouve le principe de la cartographie hydrogéomorphologique. Les ruptures de pente et la caractérisation des formes alluviales mises en relation avec l'aléa inondation font partie des éléments principaux de la légende.

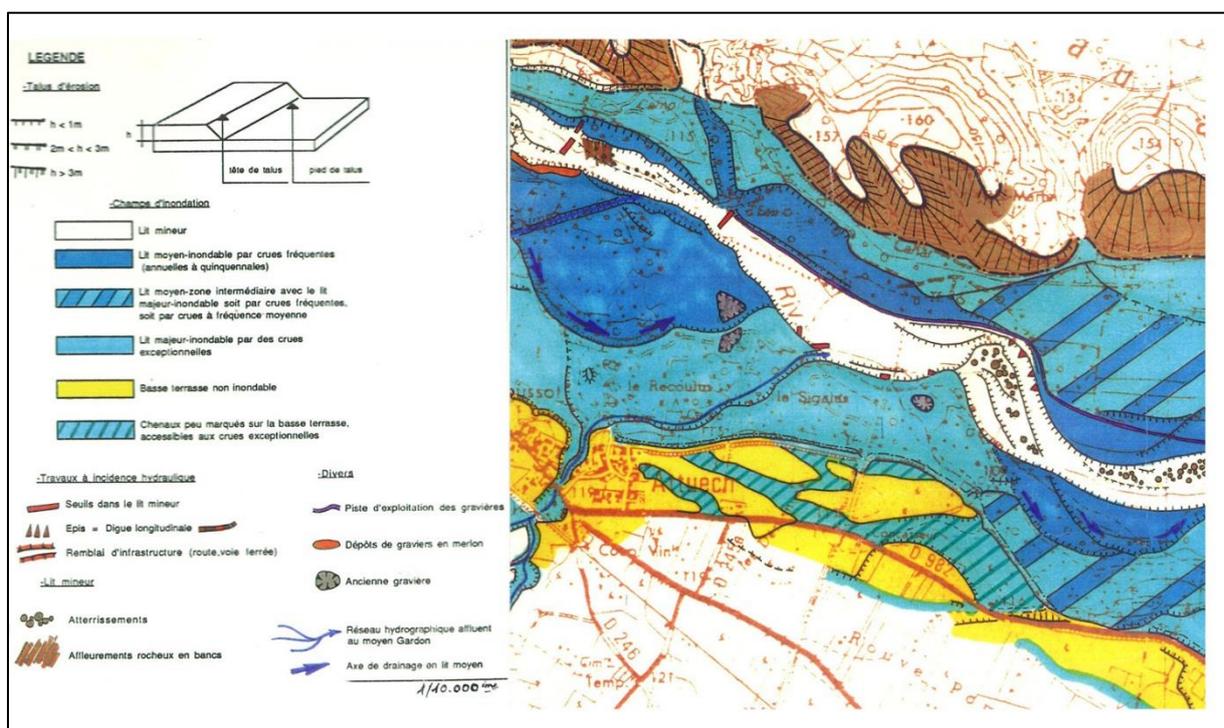


Figure 5 : Cartographie géomorphologique des zones inondables du Gardon d'Anduze (Source : CETE Méditerranée, 1986)

Le début des PPRI en 1995 est un déclencheur pour le développement de la cartographie hydrogéomorphologique. La volonté d'envisager les approches qualitatives en termes de complémentarité et non de concurrence avec les modélisations hydrauliques fut un élément moteur (Garry *et al.*, 2002). La méthode devient plus « officielle » avec la publication du guide de « cartographie des zones inondables » par « approche hydrogéomorphologique » (Masson *et al.*, 1996).

Afin de proposer une solution concrète pour la réalisation d'AZI par approche hydrogéomorphologique, le MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) publie en 2001 les « Termes de référence d'un CCTP des Atlas des Zones Inondable ». Ce guide entraîne dans

les années 2000 l'essor de la méthode tant pour la réalisation d'AZI que pour son intégration dans des PPRI.

En 2003, le MEDD adresse une circulaire aux préfets de région⁶. Cette circulaire vise à établir la politique de l'Etat en matière d'AZI. En précisant que « l'action commence par la connaissance », le MEDD identifie la cartographie hydrogéomorphologique comme une méthode possible pour la réalisation d'AZI. Par ailleurs, les DIREN se voient confier la réalisation des documents.

L'Etat français souhaite accélérer l'intégration de l'hydrogéomorphologie dans le Sud de la France par la circulaire⁷ du 21 janvier 2004 « relative à la maîtrise de l'urbanisme et adaptation des constructions en zone inondable ». Cette circulaire demande la prise en compte de l'hydrogéomorphologie pour la définition de l'aléa des PPRI dans les régions Languedoc-Roussillon, PACA et les départements de l'Ardèche et de la Drôme. Les inondations qui se sont produites « dans certains de vos départements en 1999, 2002, et 2003, ont montré qu'au-delà de toute notion de période de retour, les inondations pouvaient fréquemment réoccuper l'ensemble de la plaine alluviale des cours d'eau. Il vous faut donc intégrer dans vos réflexions les conséquences d'une crue plus forte, notamment sur la base de la crue exceptionnelle de référence hydrogéomorphologique [...] ».

1.2.3 Approche géomorphologique des zones inondables dans la littérature anglo-saxonne

Dans la continuité de la réflexion initiée par la mise en évidence des styles fluviaux (Leopold et Wolman, 1957) et par le concept de style fluvial (Schumm, 1977), des auteurs s'intéressent à la géomorphologie pour étudier les zones inondables (Baker, 1994, 1976; Wolman, 1971).

Afin d'identifier des alternatives à l'approche hydraulicienne de détermination de l'aléa inondation, Wolman (1971) présente un panel de méthodes différentes. L'analyse des formes de la plaine alluviale, la végétation ou encore la pédologie constituent des outils qui favorisent une vision naturaliste de la plaine alluviale. Baker (1976) va plus loin dans son interprétation en reliant directement l'interprétation de la géomorphologie des zones inondables à des crues historiques. L'auteur démontre que l'extension de la crue de 1952 qui touche la rivière Pedernales au Texas est délimitée par un conglomérat. Il met en évidence la relation entre zone inondable et interprétation géomorphologique. Il préconise d'utiliser cette approche à une échelle régionale en prétextant un coût relativement faible et une rapidité d'exécution.

⁶ Circulaire du 4 novembre 2003 relative à la politique de l'État en matière d'établissement d'atlas de zones inondables

⁷ Circulaire du 21/01/04 relative à la maîtrise de l'urbanisme et adaptation des constructions en zone inondable. BOMEDD n°15 du 15 août 2004

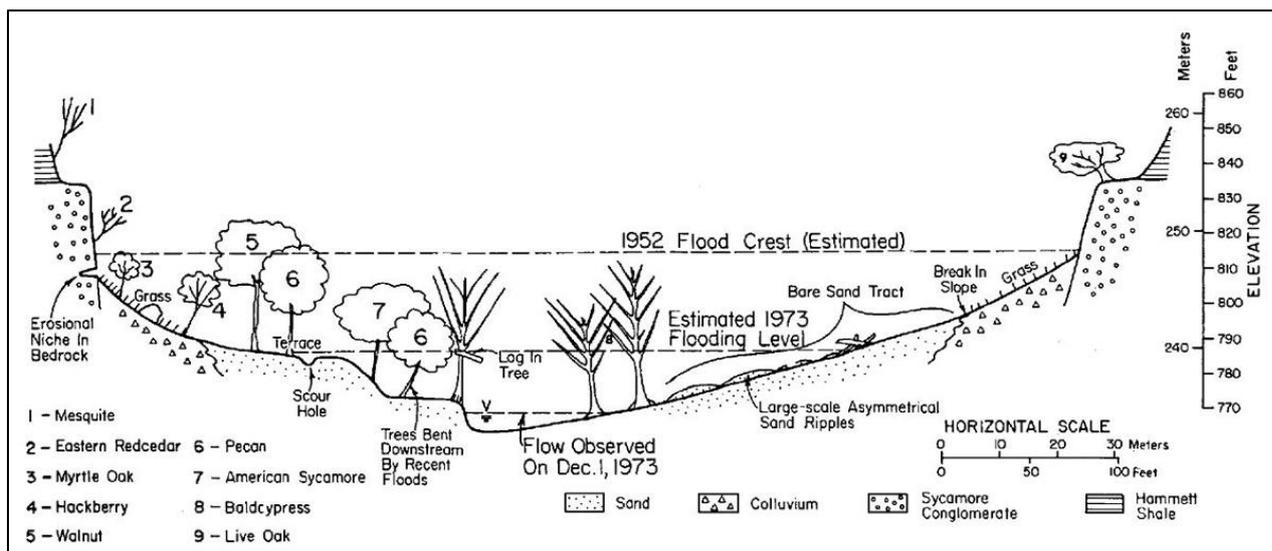


Figure 6 : Section transversale de la rivière Pedernales (Texas) et correspondance entre des formations alluviales, végétales et des crues historiques (Source : Baker, 1976)

L'approche anglo-saxonne de la cartographie des zones inondables se caractérise par l'absence d'institutionnalisation de la méthode. Contrairement à la France où la méthode fut intégrée dans les méthodes employées pour la cartographie des zones inondables.

1.2.4 Hydrogéomorphologie : un terme, mais plusieurs sens selon les acteurs

Les termes « hydrogéomorphologie » ou « hydrogéomorphologique » peuvent représenter plusieurs termes selon les acteurs qui l'utilisent. Le terme apparaît dès les années 1970 dans la littérature anglo-saxonne. Il correspond à « l'étude des formes terrestres engendrées par l'action de l'eau » (Scheidegger, 1973). Par définition, presque toutes les formes terrestres sont concernées par cette *hydrogeomorphology*, tant l'eau constitue l'agent morphogène le plus important. Le terme est par la suite repris comme une approche transdisciplinaire à la jonction entre géomorphologie et hydrologie (Sidle et Onda, 2004), ou encore dans le cadre d'études portant sur l'écologie de cours d'eau (Harpold *et al.*, 2013; Poole, 2010; Thorp *et al.*, 2010).

Des géomorphologues francophones emploient également le terme d'hydrogéomorphologie sans pour autant se situer dans une optique de cartographie des zones inondables (Arnaud-Fassetta, 2007; Brousse *et al.*, 2011; Ioana-Toroimac, 2009; Wiederkehr *et al.*, 2009).

Notre expérience avec les services de l'Etat français qui traitent du risque d'inondation montre une vision différente du terme. Au sein de DDT ou de DREAL, les termes « hydrogéomorphologie », « hydrogéomorphologique » voire tout simplement « géomorphologie » renvoient à une cartographie des zones inondables. Il est par exemple courant entendre l'expression « faire la géomorpho » comme d'un synonyme de l'expression « réaliser la cartographie des zones inondables ».

Ce décalage lexical entre une sphère universitaire et les services techniques de l'État français nous oblige à définir les principaux termes de cette thèse. Nous employons les termes d'hydrogéomorphologie ou de cartographie hydrogéomorphologique comme une méthode qui emploie une interprétation de la plaine alluviale pour cartographier des zones inondables. Cette cartographie est réalisée dans l'optique de participer à la connaissance de l'aléa inondation.

1.3 Les principes de la cartographie hydrogéomorphologique en France

Les principes de la cartographie hydrogéomorphologique française sont définis dans leurs grandes lignes par la publication du guide méthodologique de 1996 (Masson *et al.*, 1996). Ils sont repris par un guide publié par la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) PACA (2007) ainsi que par l'ouvrage de Ballais *et al.* (2011). La méthode est étayée par des travaux de thèse (Chave, 2003; Delorme-Laurent, 2007; Wulamu, 2010) et par la publication d'articles qui insistent sur sa pertinence et son applicabilité (Ballais *et al.*, 2007; Chave et Ballais, 2006; Chave, 2002; Delgado, 2006; Garry *et al.*, 2002; Masson, 1993; Wulamu *et al.*, 2013). La méthode est également déclinée dans la région Midi-Pyrénées (Lambert *et al.*, 2000). Ce corpus de connaissances en ont fait une théorie cohérente étayée sur des concepts plus ou moins stabilisés. Néanmoins, toutes les approches se rejoignent dans leur définition de l'hydrogéomorphologie, comme une approche naturaliste qui vise à cartographier les zones inondables.

1.3.1 L'interprétation hydrogéomorphologique

L'interprétation des unités hydrogéomorphologiques repose sur une approche naturaliste de la plaine alluviale (DIREN PACA, 2007; Garry *et al.*, 2002). L'inondabilité de la zone inondable hydrogéomorphologique repose sur deux hypothèses. La première d'entre elles suppose la stabilité depuis le début de l'Holocène (≈ 10000 BP) du système fluvial qui a mis en place la plaine alluviale active (lit majeur, lit moyen et lit mineur). La seconde considère que les surfaces qui la composent sont susceptibles d'être à nouveau inondées (Ballais *et al.*, 2011; Chave, 2003; Masson *et al.*, 1996).

1.3.1.1 Les critères d'identification

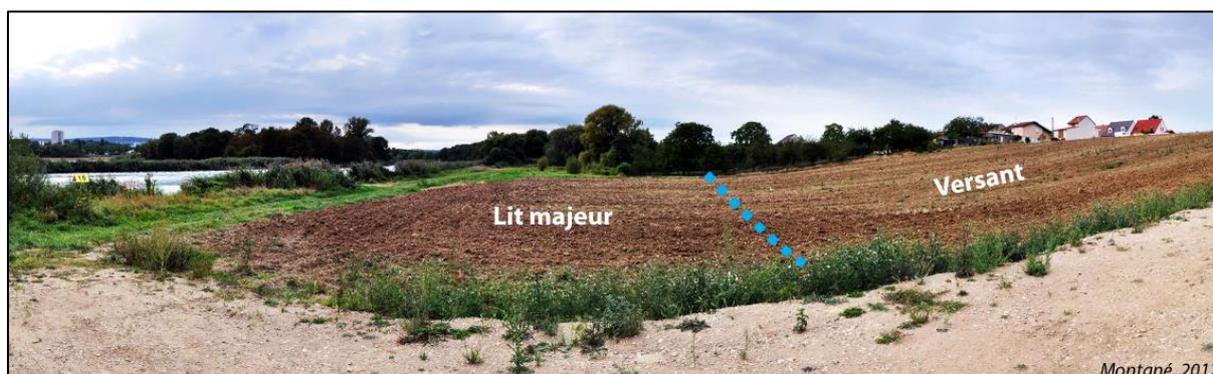
La clé d'une interprétation hydrogéomorphologique réside dans la combinaison de critères d'identification appartenant aux domaines de la morphologie, la sédimentologie, l'occupation du sol ou encore les données historiques.

L'observation de la morphologie constitue souvent la porte d'entrée de l'interprétation. Le regard du géomorphologue doit se tourner vers l'identification des ruptures de pente (Photographie 1), synonymes de changement d'unités, ainsi que vers les surfaces subhorizontales, caractéristiques des formations alluviales (Derruau, 1974; Masson *et al.*, 1996; Nanson et Croke, 1992).



Photographie 1 : Exemple de rupture de pente nette entre le lit majeur de l'Argens et les versants rocheux (Var)

Les unités de la zone inondable sont constituées de matériaux déposés par le cours d'eau tels que des limons, des sables, ou des matériaux plus grossiers, tels que des galets arrondis par le transport fluvial. A contrario, les unités de l'encaissant sont constituées de matériaux anguleux, ou surdimensionnés en comparaison de la capacité de transport du cours d'eau. L'étude de la sédimentologie est particulièrement intéressante lorsqu'il subsiste des doutes sur la localisation de la limite de la zone inondable, par exemple entre le lit majeur et des colluvions qui adoucissent le talus externe du lit majeur par ruissellement diffus (Ballais *et al.*, 2011; Delorme-Laurent, 2007; DIREN PACA, 2007; Dupont *et al.*, 2005; Masson *et al.*, 1996). La Photographie 2 illustre dans quelle mesure l'observation de la sédimentologie est importante. La limite de zone inondable bien que peu nette morphologiquement est délimitée par la différence de couleur des sols. De gauche à droite, on observe un dégradé de brun. Ce dégradé met en lumière la présence de limons plus importante en lit majeur et une pédogénèse plus développée sur le versant.



Photographie 2 : Limite de zone inondable peu nette mais visible grâce à la différence de couleur des sols (Meurthe)

En plus des deux premiers critères, il s'avère primordial de prêter attention à l'occupation du sol qui fournit de précieux indices quant au caractère inondable ou non d'une surface. Par exemple, le contraste entre la végétation hygrophile présente en zone inondable (peuplier, aulnes, frênes...) et les espèces végétales qui n'aiment pas l'humidité (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996).

Enfin, la manière dont les sociétés humaines ont aménagé leur territoire est source de nombreuses indications utiles. Par exemple l'ancienneté des bâtiments est à prendre en compte. En effet, d'un point de vue schématique les constructions les plus anciennes se trouvent hors zone inondable tandis que les constructions les plus récentes (ex : lotissements) occupent fréquemment les zones inondables (Masson *et al.*, 1996). D'autres indices tels que la présence de glissières de batardeaux dans les portes (Photographie 3), ou encore la toponymie des lieudits ou des rues sont très utiles dans l'interprétation.



Photographie 3 : Glissières synonymes de l'utilisation d'un batardeau en cas de crue (Collioure, 66)

Si la cartographie hydrogéomorphologique est une approche naturaliste, les informations sur les crues historiques sont tout de même primordiales car elles apportent une légitimité à l'interprétation. Lors de la réalisation de l'AZI de la Berre, ce repère (Photographie 4) de la crue de 1999 a confirmé l'inondabilité de la zone déterminée par l'analyse de la topographie.



1.3.1.2 Les méthodes

La méthodologie « classique » de la cartographie hydrogéomorphologique est une combinaison de photo-interprétation et de validations de terrain à dire d'expert. Les principales étapes de réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique sont définies dans les différents guides méthodologiques qui la concernent (Ballais *et al.*, 2011; DIREN PACA, 2007; Masson *et al.*, 1996).

La première étape est la réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique sous forme papier, à partir des observations effectuées lors de la photo-interprétation. Ces cartes papier trouvent toute leur utilité lors des vérifications de terrain puisqu'elles permettent de noter des observations ou d'effectuer des modifications directement sur le support cartographique. La dernière étape consiste à numériser l'information géographique contenue dans les cartes en tables SIG qui sont assemblées pour obtenir la cartographie finale.

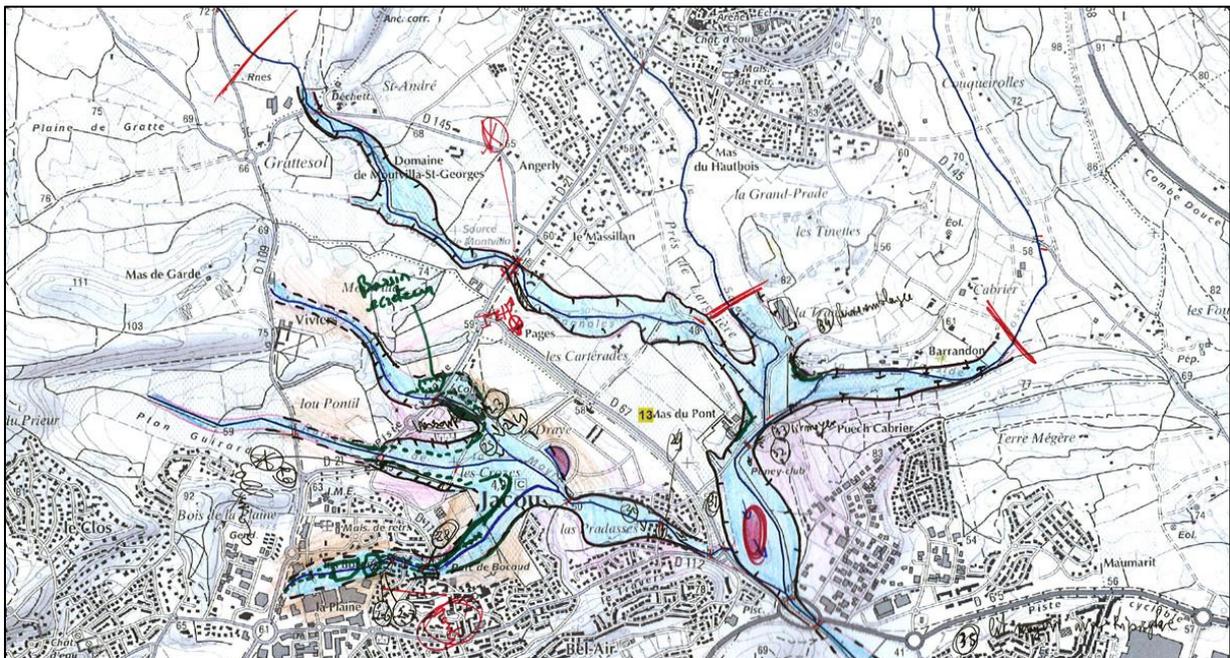


Figure 7 : Exemple de carte papier, avec annotations de terrain (source : BURGEAP)

1.3.2 Les unités hydrogéomorphologiques

Lors de la réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique, le géomorphologue doit garder à l'esprit que la principale information reste la localisation de la limite de zone inondable. C'est l'information minimale que l'on attend de ce travail, car elle correspond à ce que les services de l'état utiliseront en priorité s'ils sont amenés à réutiliser la donnée géographique, par exemple pour un PPRI.

Il existe deux types d'unités dans la cartographie hydrogéomorphologique telle que définie par Masson (*et al.*, 1996) : la zone inondable, constituée du lit mineur, parfois du lit moyen et du lit majeur ; l'encaissant, composé des versants, des terrasses alluviales et du colluvionnement (Figure 8). Les AZI hydrogéomorphologiques présentent également des figurés linéaires utiles à la compréhension du fonctionnement du cours d'eau en crue (MEDD, 2001).

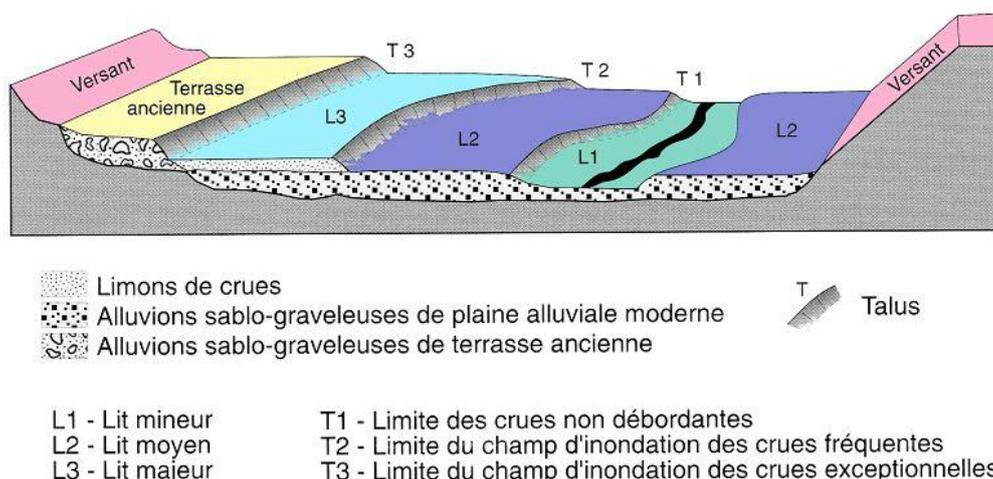


Figure 8 : Les unités hydrogéomorphologiques (d'après Masson *et al.*, 1996)

1.3.2.1 La zone inondable

Une zone est considérée comme inondable lorsqu'elle correspond à des alluvions déposées par un cours d'eau depuis la fin de la dernière glaciation. L'Holocène étant considéré comme stable (Ballais *et al.*, 2011; Chave, 2003; Masson *et al.*, 1996).

Le lit mineur est composé du chenal d'étiage et de bancs sédimentaires non végétalisés ou bien de manière discontinue. Cette quasi-absence de végétation s'explique par la fréquence élevée des crues et les vitesses importantes qui permettent le remaniement des bancs de matériaux grossiers (galets voire blocs). Les limites du lit mineur correspondent à l'enveloppe du débit de plein bord, débit le plus morphogène pour le cours d'eau (Bravard et Petit, 1997).

Le lit moyen est séparé du lit mineur par un talus ; c'est une surface située à une altitude intermédiaire entre le lit mineur et le lit majeur. Ces formations se trouvent principalement dans des régions à pluviométrie contrastée (Delorme-Laurent, 2007), telles que les régions méditerranéennes et de manière préférentielle dans les zones de transfert des cours d'eau. Les lits moyens possèdent une topographie irrégulière composée de chenaux et de zones de dépôts de sédiments grossiers expliqués par les courants puissants qui peuvent parcourir cette surface. La fréquence de submersion de cette surface varie de 1 à 10 ans (Masson *et al.*, 1996). L'occupation du sol des lits moyens est majoritairement constituée d'une ripisylve dense et l'empreinte des activités humaines y est peu visible en raison de la fréquence et de la puissance des écoulements.

Le lit majeur se situe directement au-dessus du lit moyen pour les cours d'eau à régime contrasté et au-dessus du lit mineur pour les autres. Au contraire des lits mineur et moyen, le lit majeur a une topographie très régulière représentative des courants peu dynamiques qui l'atteignent qui sont également moins fréquents. Cette formation est principalement constituée d'éléments fins, à mettre en relation avec les processus de décantation qui sont dominants. Les lits majeurs sont des espaces très prisés des sociétés humaines en raison de la fertilité des sols et des surfaces planes faciles à aménager. Ils concentrent la grande majorité des enjeux en zone inondable. (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996). Il est important de bien distinguer le lit majeur géomorphologique défini par ses caractéristiques physiques décrites ci-dessus, du lit majeur hydrologique que les ingénieurs hydrauliciens définissent comme la surface inondée pour une certaine période de retour. Il n'est donc pas possible de délimiter avec des observations de terrain le lit majeur hydrologique (Astrade, 1998; Bravard et Petit, 1997).

Sylvain Chave définit dès (2002) l'existence d'un niveau situé au-dessus du lit majeur et délimité par un talus, nommé « lit majeur exceptionnel ». Cette formation dont l'existence est relayée par d'autres travaux (Ballais *et al.*, 2011; Delorme-Laurent, 2007) est repérée sur différents cours d'eau méditerranéens. La DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) de la région Languedoc-Roussillon intègre même le lit majeur exceptionnel sur certains AZI. Cependant leur représentation cartographique diffère de la définition initiale. En effet, les lits majeurs exceptionnels présents dans les AZI constituent des zones d'incertitude ou d'imprécision, au contact entre les lits majeurs et des colluvions. Ils autorisent à l'auteur de la carte une marge d'erreur. L'étude des lits majeurs exceptionnels peut certes présenter des intérêts d'un point de vue géomorphologique, mais leur intérêt pour les sociétés humaines reste limité. Nous choisissons de ne pas prendre en compte cette unité dans le cadre de ce travail de recherche. En effet, il reste compliqué de faire accepter l'inondabilité du lit majeur. Ajouter un autre niveau apporterait beaucoup de confusion pour les personnes non initiées à la méthode.

1.3.2.2 L'encaissant

L'encaissant est composé de trois unités : les versants, les terrasses alluviales et les colluvions.

Les versants correspondent à la roche en place qui est plus ou moins visible en fonction de sa dureté. La compréhension de la lithologie est utile à l'interprétation hydrogéomorphologique car elle détermine les formes des vallées étudiées et l'apparence des limites de zones inondables.

Les terrasses alluviales sont des formations situées au-dessus du lit majeur. Dans la conception française de la cartographie hydrogéomorphologique, ces terrasses sont constituées de dépôts fluvio-glaciaires déposés durant les dernières glaciations. Les cours d'eau se sont incisés dans ces dépôts grossiers pour ensuite déposer les alluvions contemporaines (Derruau, 1974). Au-delà de leur composition fluvio glaciaire, les terrasses correspondent surtout à des formations héritées d'un autre fonctionnement du cours d'eau. Ainsi, des terrasses peuvent correspondre à des dépôts deltaïques (Marchand *et al.*, 2013a). On distingue la plaine alluviale constituée des unités de la zone inondable et des terrasses alluviales, de la plaine alluviale active constituée uniquement des unités de la zone inondable. Dans la pratique, une terrasse alluviale s'identifie par le talus qui la sépare du lit majeur,

par sa forme sur-horizontale et par sa sédimentologie constituée de matériaux arrondis plus grossiers que dans le lit majeur et parfois d'apparence rougeâtre en raison du développement de sols.

Les colluvions correspondent à des matériaux provenant de l'érosion hydrique des versants et qui s'accumulent dans les ruptures de pente, masquant ainsi le contact entre le lit majeur et l'encaissant. Ils contiennent des matériaux anguleux qui se distinguent des matériaux arrondis déposés par le cours d'eau. La Figure 9 illustre comment le colluvionnement peut compliquer la localisation de la limite du lit majeur en la recouvrant. Dans la pratique, le colluvionnement correspond à un contact peu net entre un versant souvent constitué de roches peu cohérentes telles que les marnes. La représentation de colluvionnement sur une cartographie coïncide avec une zone d'incertitudes.

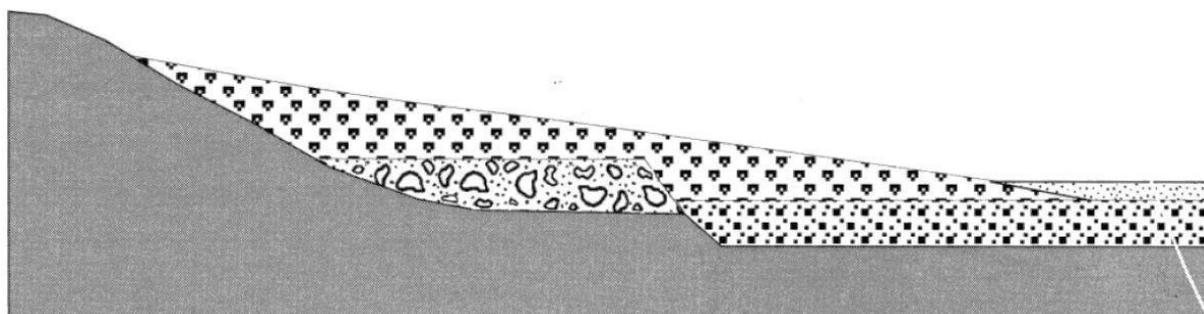


Figure 9 : Recouvrement de la limite externe du lit majeur par le colluvionnement (Masson et al, 1996)

1.4 L'hydrogéomorphologie dans la pratique

1.4.1 La diffusion des cartographies hydrogéomorphologiques

Les AZI, produits par les DREAL constituent la première forme de cartographie hydrogéomorphologique. Ces documents sont réalisés par bassin versant et font l'objet d'appels d'offre pour lesquels des bureaux d'étude privés proposent leurs services. Les AZI sont disponibles sous format SIG par le biais de plateformes propres à chaque DREAL (Figure 10) ou par le site Internet Cartorisque (Figure 11).

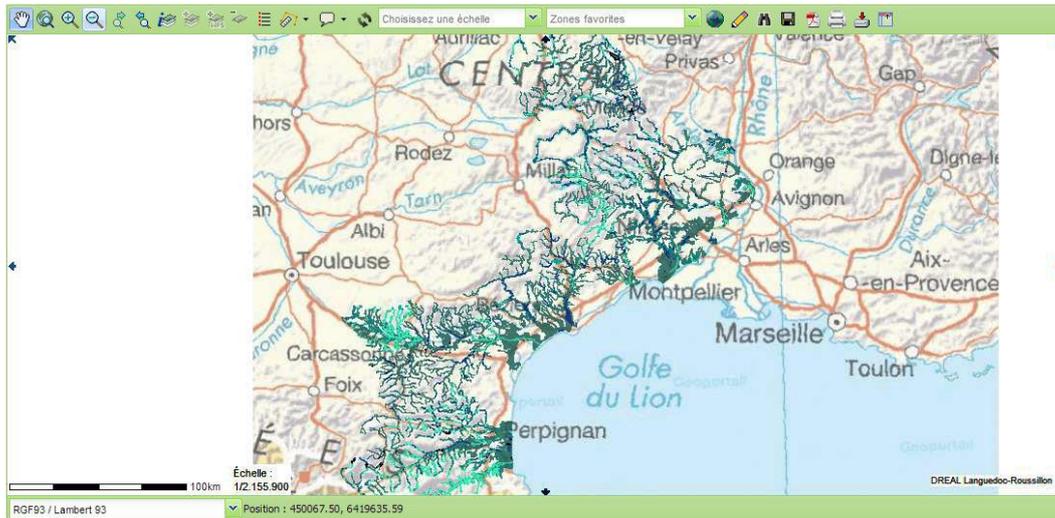


Figure 10 : Aperçu des AZI hydrogéomorphologiques sur la plateforme CARMEN de la DREAL Languedoc-Roussillon (http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr/19/dreal_lr_general.map)

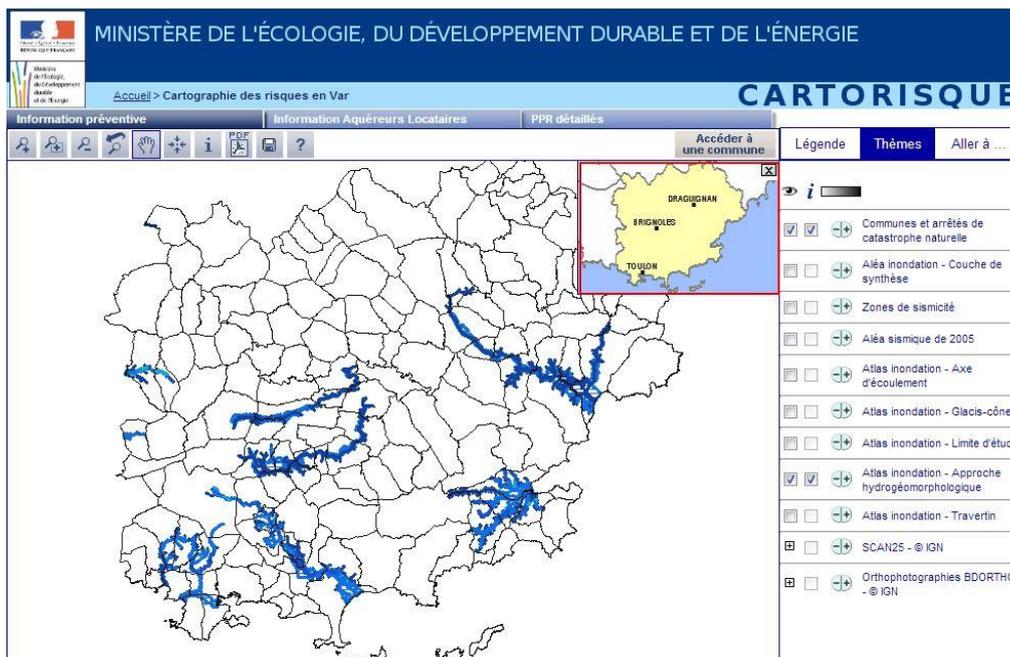


Figure 11 : Aperçu des AZI hydrogéomorphologiques pour le département du Var (http://cartorisque.prim.net/dpt/83/83_ip.html)

Si la DREAL qui produit les données ne diffuse pas ses AZI sous format SIG, elle peut les mettre à la disposition du public via son site internet sous format PDF. Pour des questions de réutilisation des données pour d'autres études, la diffusion de données SIG reste plus efficace.

Les AZI constituent la « partie visible » de l'hydrogéomorphologie. Mais il existe une partie « non visible » qui se trouve dans certains PPRI. En effet, lorsqu'un AZI hydrogéomorphologique existe sur un cours d'eau, il est souvent réutilisé pour l'élaboration des cartes d'aléa des PPRI. Cependant,

certaines PPRI utilisent une cartographie hydrogéomorphologique réalisée dans le cadre de l'étude car la donnée était inexistante. En conséquence de nombreuses cartographies hydrogéomorphologiques sont produites à l'échelle de quelques communes ou de tronçons de rivières. Cette pratique aboutit à un manque d'homogénéité en raison d'études échelonnées dans le temps et réalisées par différentes personnes. Cette partie « non visible » de l'hydrogéomorphologie fait l'objet d'une analyse dans notre recherche, tant sur le plan de la répartition spatiale que sur l'utilisation qui en résulte.

La question du type de données utilisés pour les Atlas de Zone Inondable est déjà abordé dans les travaux de Chemitte (2008) et Gerin (2011), qui mettent en avant l'hétérogénéité des types de méthodes employées. Trois grands types de données émergent pour les AZI, à savoir les modélisations hydrauliques de crues statistiques (généralement crue centennale), les cartographies de crues historiques et les AZI qui utilisent la géomorphologie pour la cartographie des zones inondables (Figure 12). La méthode utilisée pour la réalisation d'un AZI n'est pas toujours indiquée dans les métadonnées. Mais après un tri des données SIG, on estime à 36 000 km le linéaire total de cours d'eau couvert par un AZI hydrogéomorphologique.

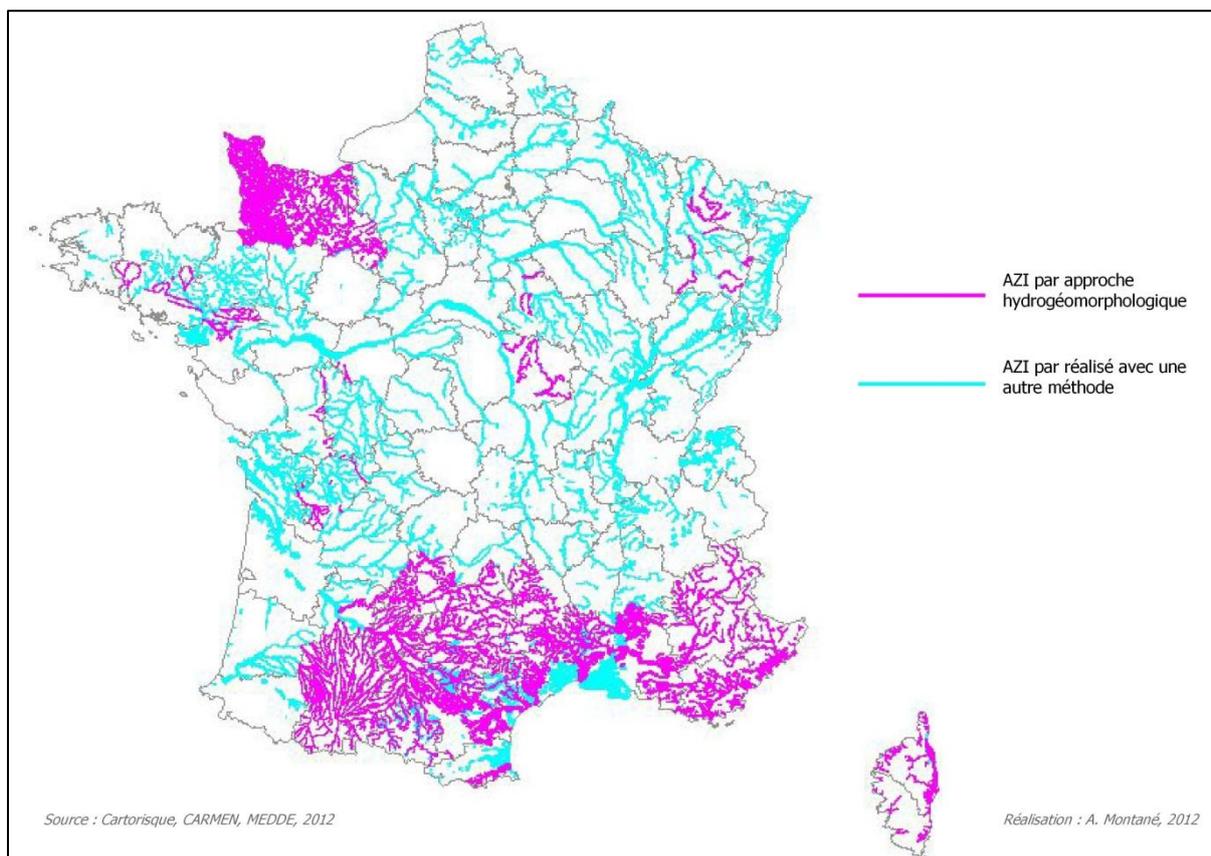


Figure 12 : Les AZI par approche hydrogéomorphologique en France

1.4.2 Les différents types d'AZI hydrogéomorphologique

La majorité des AZI produits en France n'utilisent pas l'hydrogéomorphologie. Ils prennent en compte majoritairement des cartographies de crues historiques ou de crues centennales modélisées. Seules cinq régions présentent une couverture quasi complète de leur réseau hydrographique par des AZI hydrogéomorphologiques. Cela révèle une réelle appropriation de l'approche par les DREAL concernées.

Les régions PACA, Languedoc-Roussillon et Corse correspondent au secteur d'influence du CETE Méditerranée, basé à Aix-en-Provence. La méthode y fut systématiquement intégrée à la cartographie des zones inondables (Figure 13a). La légende et la symbologie de ces cartographies correspondent à la méthodologie mise en avant par le Ministère, ainsi qu'à la légende approuvée par le cahier des charges type de 2001 (Masson *et al.*, 1996; MEDD, 2001). On y retrouve les trois types de lits qui composent la zone inondable, les unités de l'encaissant, ainsi que des informations linéaires qui caractérisent l'hydrodynamisme (axes d'écoulement, dépressions...).

Les deux autres régions où la géomorphologie est systématiquement utilisée pour la cartographie des zones inondables sont les régions Midi-Pyrénées et Basse-Normandie. Les méthodes employées diffèrent de celle utilisée sur le pourtour méditerranéen par l'emploi plus important des données de crues historiques, mais aussi par une représentation cartographique différente. Ces deux approches se distinguent des AZI « méditerranéens » par la relative simplicité de la légende. Mais surtout, les unités de l'encaissant sont absentes. Leur localisation fait partie intégrante de l'interprétation, mais elles ne figurent pas sur la cartographie finale.

Dans la région Midi-Pyrénées, c'est la méthode développée par des géographes de l'université Toulouse-le-Mirail (Lambert *et al.*, 2000) qui sert de référence pour la réalisation des CIZI (Cartographie Informatrice des Zones Inondables). Ces cartographies permettent une homogénéité des rendus cartographiques jusque dans les PPRI fondés sur ces mêmes CIZI (Préfecture de la région Midi-Pyrénées, 2008) (Figure 13b). Cette combinaison entre des données historiques et géomorphologique est favorisée par l'abondance de repères de Plus Hautes Eaux Connues (PHEC) dans la région. Dans ces atlas, les nombreuses informations historiques apportent un complément pour la validation des limites externes des zones inondables. A l'intérieur des zones inondables ce ne sont pas des lits géomorphologiques qui sont représentées, mais des fréquences d'inondation qualitatives (inondé chaque année, inondé fréquemment et zone d'inondation exceptionnelle). Cette représentation de fréquences de submersion correspond à une différence majeure avec l'approche « méditerranéenne ». La cartographie des zones inondables n'est plus caractérisée par la localisation de formes, mais par des processus.

La région Basse-Normandie (Figure 13c) connaît en 1995 des inondations généralisées. Ces événements pluvieux entraînent notamment des phénomènes de crues torrentiels dans des vallons secs, voire des coulées de boue (Douvinet, 2008). La concomitance avec la volonté de l'État de cartographier les zones inondables (METT, 1994) justifie la réalisation d'Atlas de Zones Inondables. Ceux-ci utilisent des informations historiques dans les zones à enjeux et sont complétés par une cartographie hydrogéomorphologique dans les zones plus rurales. La définition de cette méthode

début dès 1995 (DIREN de Basse-Normandie, 2006, 1996). Elle fournit par ailleurs à la région Basse-Normandie une des couvertures d'AZI les plus complètes de France (Figure 12). La représentation cartographique se distingue des deux autres régions par sa relative simplicité. En effet, seules les limites de zones inondables figurent sur la carte.

Citons également le travail réalisé pour le compte de la DIREN Bretagne. Il a pour objet « la définition d'indicateurs » pour la réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques en Bretagne (Dupont *et al.*, 2005). Ce travail met en avant la pertinence de l'approche pour les cours d'eau bretons. Il insiste en outre sur la nécessité d'adapter l'interprétation par rapport à celle développée pour le Midi Méditerranéen, notamment par rapport aux limites de zone inondable qui s'avèrent moins nettes. La Bretagne n'a pas fait l'objet par la suite d'un guide méthodologique particulier.

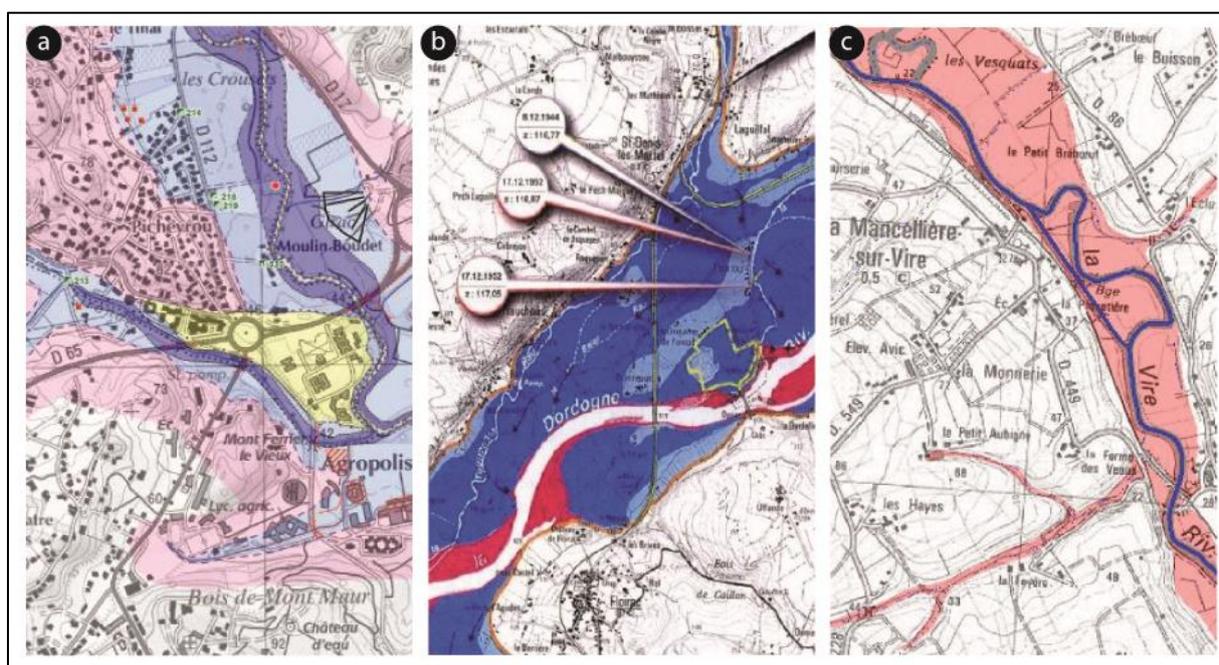


Figure 13 : Extraits de cartographies hydrogéomorphologiques en Languedoc-Roussillon (a), Midi-Pyrénées (b) et Basse-Normandie (c). (Source : DREAL Languedoc-Roussillon ; DREAL Midi-Pyrénées ; DREAL Basse-Normandie)

En plus des AZI hydrogéomorphologiques qui sont encadrés méthodologiquement par les DREAL, certains AZI sont réalisés ponctuellement, comme par exemple dans la Vienne⁸ (Figure 14a), en Saône-et-Loire⁹ (Figure 14b) ou encore en outre-mer¹⁰ (Figure 14c). Ces AZI utilisent la méthodologie développée par le CETE Méditerranée, avec la distinction des trois lits fluviaux et les unités de l'encaissant.

⁸ DDE de la Vienne, 2009. Atlas des Zones Inondables de 27 cours d'eau dans le département de la Vienne par analyse hydrogéomorphologique. 32 p.

⁹ DIREN de Bourgogne, 2009. Atlas des zones inondables de la Petite Grosne et autres rivières. Rapport d'étude. 24 p.

¹⁰ DIREN de Guadeloupe, 2008. AZI des cours d'eau de la Basse Terre par des techniques d'analyses hydrogéomorphologiques. 126 p.

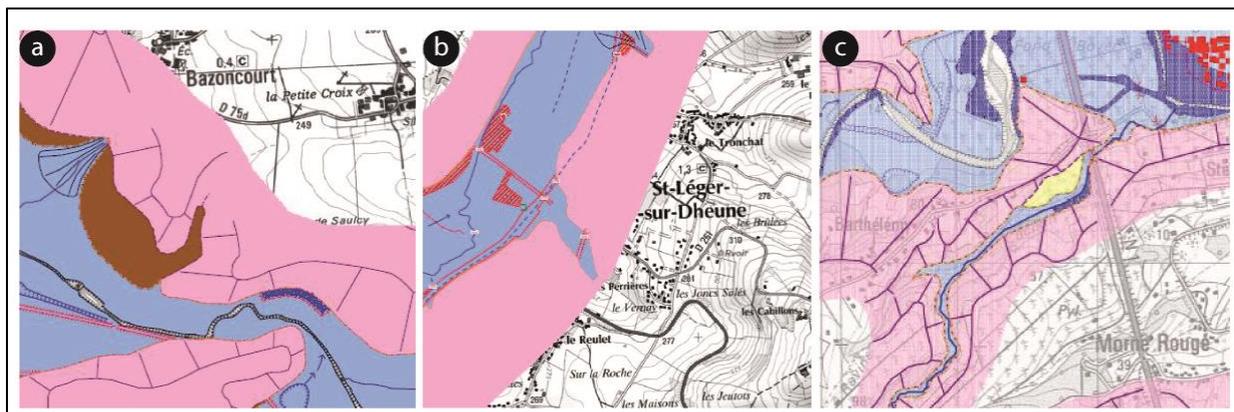


Figure 14 : Extraits de cartographies hydrogéomorphologiques dans la Vienne (a), la Saône-et-Loire(b) et Guadeloupe (c). (Source : DDE de la Vienne, DIREN de Bourgogne et DIREN de Guadeloupe)

Les cartographies hydrogéomorphologiques ne concernent pas les grands cours d'eau et fleuves français, mises à part la Garonne et la Durance. Afin de combler ce manque, la DIREN Rhône-Alpes a commandé la réalisation d'un « atlas paléo-environnemental de la plaine alluviale du Rhône de la frontière suisse à la mer » (Bravard *et al.*, 2008). Ce travail met l'accent sur une légende plus adaptée aux grands cours d'eau tel que le Rhône. Ce fleuve a en effet subi des modifications anthropiques majeures durant les derniers siècles et possède une histoire paléo-environnementale plus complexe que des cours d'eau de taille inférieure. La légende de la zone inondable (S_INON) comporte 6 unités surfaciques majeures et jusqu'à 47 unités élémentaires, complétées par les informations sur l'encaissant et des informations linéaires et ponctuelles. Cette cartographie qui mobilisa de nombreux universitaires n'est pas diffusée en format SIG. Elle conserve un aspect expérimental car non considéré comme un AZI. Néanmoins, cette cartographie est le reflet d'une volonté d'employer l'interprétation des formations alluviales pour délimiter les zones inondables.

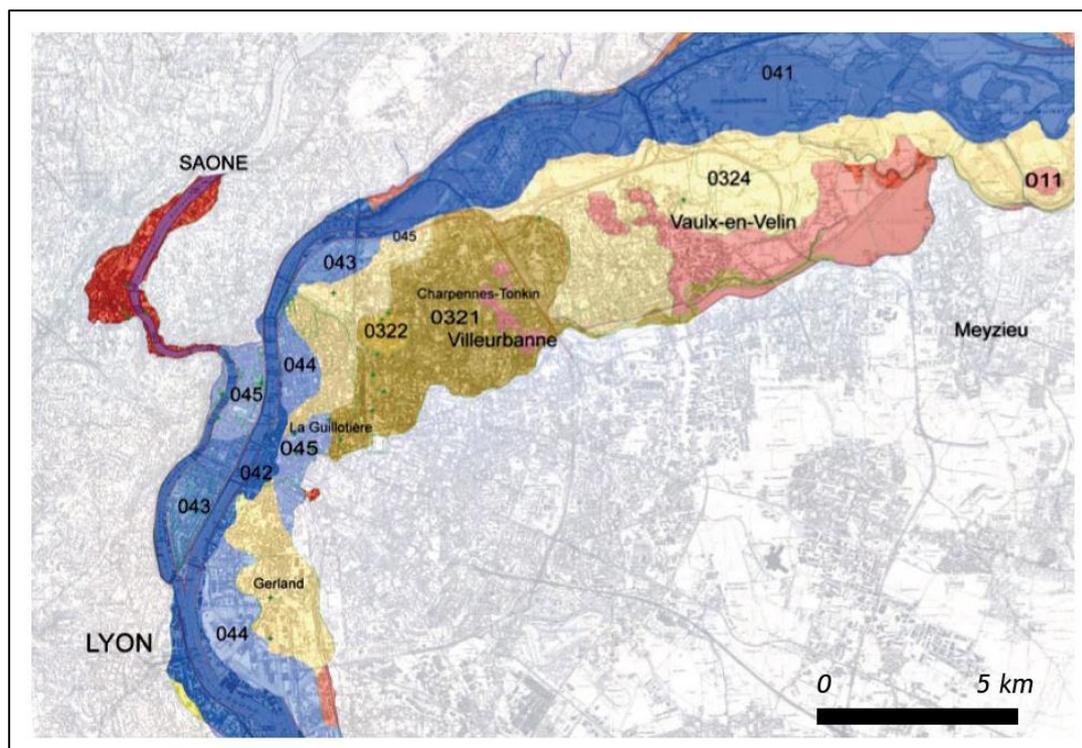


Figure 15 : Cartographie paléo-environnementale du Rhône, zoom sur le secteur de Lyon. (Bravard *et al.*, 2008)

Il n'y a pas en France une seule manière d'utiliser l'interprétation géomorphologique pour cartographier les zones inondables. L'hétérogénéité des méthodes laisse toutefois apparaître un point commun, à savoir la représentation de l'extension maximale des zones inondables.

1.4.3 Les crues extrêmes : justification majeure du recours à la cartographie hydrogéomorphologique

La catastrophe correspond à la matérialisation du risque. C'est le passage d'un phénomène appartenant à la sphère de la probabilité à une réalité parfois cruelle pour les sociétés humaines. Comme le note Collombat (2012), qui fait le parallèle entre les grandes inondations qui ont marqué la France lors des trente dernières années et les lois portant sur la gestion des inondations, la catastrophe joue un rôle moteur dans le changement de pratiques. Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique n'échappe pas à cette logique. Les retours d'expérience des crues extrêmes ont forgé la valeur de la cartographie hydrogéomorphologique. Comme le rappelle la circulaire ministérielle de 2004¹¹ « les événements les plus récents [...] ont montré qu'au-delà de toute période de retour, les inondations pouvaient fréquemment réoccuper l'ensemble de la plaine alluviale des cours d'eau ».

¹¹ Circulaire du 21/01/04 relative à la maîtrise de l'urbanisme et adaptation des constructions en zone inondable. BOMEDD n°15 du 15 août 2004

Les inondations catastrophiques causées par l'Ouvèze le 22 septembre 1992 furent l'occasion pour des géomorphologues de démontrer l'intérêt de leur science pour la compréhension du fonctionnement d'une crue extrême (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993) et de mettre en avant la correspondance entre cette inondation et la cartographie hydrogéomorphologique (Masson, 1993). Puis la crue de 1999 dans l'Aude a fait l'objet d'études similaires (Chave, 2002), ainsi que les inondations de 2002 sur les Gardons (Ballais, 2006; Delgado, 2006; Esposito, 2003).

Au-delà de la comparaison qualitative des zones inondables et des zones effectivement inondées, certains auteurs montrent que la cartographie hydrogéomorphologique a une signification sur les plans hydrologiques et hydrauliques. Cette signification se retrouve dans l'élaboration de la « Méthode Intégrée » sur l'Orbieu et l'Argent-Double (Chave, 2003) ou encore sur l'Ouvèze (BCEOM, 2004; CAREX, 2004). La crue remplissant entièrement le lit majeur est appelée « crue hydrogéomorphologique ».

Ces retours d'expérience mettent en avant la pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique, de plus ils ont établi que les modèles hydrologiques et hydrauliques ne suffisaient pas à prendre en compte l'aléa inondation dans sa globalité. De nombreux auteurs insistent sur la nécessité d'utiliser les deux approches de manière complémentaire (Ballais *et al.*, 2011; Chave, 2003; Delgado, 2006; Garry *et al.*, 2002).

1.4.4 Les cartographies HGM hors de France

La France n'est pas le seul pays dans lequel la cartographie hydrogéomorphologique est expérimentée. Ballais *et al.* (2011) font un point sur différentes publications mettant en avant l'utilisation de la géomorphologie pour cartographier les zones inondables. En Espagne, des travaux s'appuyant sur l'approche développée par Masson *et al.* (1996) montrent l'intérêt de la cartographie hydrogéomorphologique en le couplant avec un modèle hydraulique (Lastra *et al.*, 2008) ou pour analyser les crues torrentielles du Nord de la Catalogne (Mascareñas i Rubiés, 2012) ou encore dans la région de Valence (Camarasa-Belmonte et Soriano-García, 2012). En Italie, la recherche de Luino (1998) détaille comment la géomorphologie permet de mieux appréhender l'aléa inondation dans le Nord du pays. Signalons également les travaux réalisés en Chine (Wulamu, 2010; Wulamu *et al.*, 2013), en Tunisie (Chouari, 2009) ou au Salvador (Fernández-Lavado *et al.*, 2007). Rappelons également les différentes expérimentations menées aux États-Unis qui illustrent la pertinence de l'interprétation géomorphologique pour la cartographie des zones inondables (Baker, 1994, 1976; Wolman, 1971).

La cartographie hydrogéomorphologique au Québec connaît sa genèse après les événements de Rivière-au-Renard, dans l'Est de la province à l'automne 2007. Cette inondation marque les esprits par les dégâts humains et matériels. Elle attire l'attention du MSP (Ministère de la Sécurité Publique) et de géomorphologues québécois en raison du caractère extrême de l'inondation. Cet événement se distingue par le remplissage complet du lit majeur qui s'accompagne de phénomènes de débâcles et d'érosion fluviale intense (Lelièvre *et al.*, 2008). Les auteurs mettent en avant que les modèles hydrauliques représentant la crue centennale sur ce cours d'eau n'ont pu anticiper ni l'étendue des

inondations, ni le fonctionnement torrentiel du cours d'eau en crue. Suite à ce retour d'expérience, le MSP confie au laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR (Université du Québec à Rimouski) la réalisation d'un guide méthodologique reposant sur une cartographie expérimentale sur la rivière Matane (Olsen *et al.*, 2011). Le concept de cartographie hydrogéomorphologique est repris en 2013 dans le cadre d'un rapport remis au Consortium OURANOS (Biron *et al.*, 2013). L'hydrogéomorphologie est présentée comme une méthode de cartographie des zones inondables, avec des applications sur plusieurs rivières du Québec (Demers *et al.*, 2014).

Tout comme en France, la grande majorité des publications scientifiques relatives à la cartographie hydrogéomorphologique font état d'expérimentations menées sur des terrains d'étude. Et en guise de conclusion, elles recommandent l'utilisation de la géomorphologie pour diagnostiquer l'aléa inondation. La question des usages liés à cette approche par les autorités en charge de la gestion du risque d'inondation ne font l'objet d'aucune communication. En conséquence, il reste impossible de savoir si l'hydrogéomorphologie y constitue une simple approche expérimentale ou une composante du diagnostic de l'aléa inondation. Seul l'exemple du Québec se distingue par la volonté affichée des autorités d'intégrer la cartographie hydrogéomorphologique pour le diagnostic de l'aléa inondation.

1.5 Conclusions

La cartographie hydrogéomorphologique est une méthode dont la validité scientifique pour la cartographie des zones inondables est incontestable (Ballais *et al.*, 2011; Chave, 2003; Garry *et al.*, 2002; Masson *et al.*, 1996). Cette approche, héritière des grandes réflexions sur la géomorphologie (Leopold *et al.*, 1964; Nanson et Croke, 1992; Schumm, 1977) et du développement de la cartographie géomorphologique (Joly, 1962; Tricart, 1965) présente encore des points à approfondir.

La cartographie hydrogéomorphologique est recommandée pour la réalisation des PPRI (METLTM et MEDD, 2004). Pourtant, cette prise en compte de l'hydrogéomorphologie ne fait l'objet d'aucune publication. Il devient donc nécessaire d'identifier les pratiques réglementaires liées à la cartographie hydrogéomorphologique.

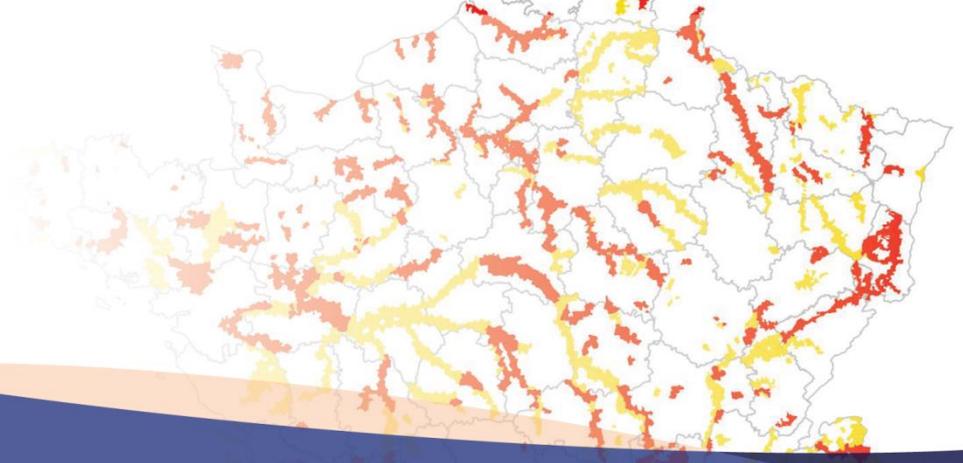
La question de l'adhésion des acteurs de la gestion du risque inondation à la cartographie hydrogéomorphologique constitue un point fondamental, pourtant absent de la littérature. En nous adressant directement aux services techniques de l'Etat français, nous devons mettre en avant les lacunes de la méthode, sur le plan cartographique ou réglementaire.

La « Directive Inondation » demande la réalisation de cartes de hauteurs d'eau pour une crue dite de « faible probabilité ». En nous appuyant sur le développement des MNT LiDAR, nous cherchons à définir de quelle manière la cartographie hydrogéomorphologique peut-elle évoluer pour correspondre à cette demande.

En France, la cartographie hydrogéomorphologique est cataloguée comme une méthode adaptée aux cours d'eau méditerranéens. Ce paradigme provient en partie de la forte concentration d'études dans ce milieu (Ballais, 2006; Ballais *et al.*, 2011, 2005; Delgado, 2006; Masson *et al.*, 1996). Cela constitue un frein à sa diffusion. Au travers de différents sites en France et au Québec, nous devons établir

quelles sont les véritables incertitudes que l'on peut rencontrer lors de la réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique.

La plus grande lacune de la recherche portant sur la cartographie hydrogéomorphologique est d'être centrée sur des aspects techniques et géomorphologiques. Dans l'optique de promouvoir cette approche, nous cherchons à synthétiser les différentes thématiques abordées dans ce travail. Cette vision synthétique doit permettre d'identifier les différentes étapes du processus de développement de l'approche hydrogéomorphologique dans un territoire.



Chapitre 2

Évaluation de la place de la cartographie
hydrogéomorphologique dans la gestion du risque
inondation en France

Le PPRI est le document central de la planification urbaine des zones inondables depuis 1995. Il participe activement à territorialiser le risque d'inondation (Pigeon, 2007). C'est en grande partie grâce à l'augmentation de leur nombre durant les années 2000 (Gerin, 2011) que la cartographie hydrogéomorphologique a pu se développer via des Atlas de Zones Inondables et proposer une donnée qualitative à faible coût recommandée par l'Etat pour l'élaboration des PPRI (Garry et Grasz, 1999). Bien que de nombreux auteurs affirment que la cartographie hydrogéomorphologique fait désormais partie du processus de réalisation des PPRI (Ballais *et al.*, 2011, 2005; Delgado, 2006; Delorme-Laurent, 2007; Garry *et al.*, 2002), il demeure difficile de mentionner précisément des pratiques réglementaires associées à l'hydrogéomorphologie. Des évaluations de l'outil PPRI ont déjà été effectuées (Monge *et al.*, 2003). Mais aucune ne concerne spécifiquement l'usage de l'approche hydrogéomorphologique tant dans sa contribution au diagnostic de l'aléa que dans sa traduction réglementaire.

Nous proposons dans ce chapitre d'analyser le rôle joué par la cartographie hydrogéomorphologique dans la réalisation des PPRI. Dans un premier temps nous aborderons la représentation de la cartographie hydrogéomorphologique par les services techniques de l'Etat (DREAL, DDT). Dans un second temps, nous établirons grâce à des exemples de PPRI, de quelle manière la présence ou non d'AZI hydrogéomorphologiques constitue un atout pour le diagnostic de l'aléa inondation. Enfin, dans un troisième temps nous analyserons les rapports de 282 PPRI répartis en France. Cette analyse permet de mettre en avant une typologie de prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique.

2.1 La représentation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les services instructeurs

Dans l'optique de proposer des évolutions à la cartographie hydrogéomorphologique, il est indispensable de connaître et de comprendre la représentation de la méthode que se font les services de l'Etat. En sciences sociales, la représentation correspond à la compréhension d'un phénomène qui repose sur des connaissances, mêmes partielles (Jodelet, 1989). L'étude de la représentation vise notamment à recueillir l'avis de personnes concernées par la méthode, en s'appuyant sur leur expérience. L'étude de la représentation de la cartographie hydrogéomorphologique est donc appropriée pour les DDT¹² et les DREAL¹³ auxquelles nous avons adressé des questionnaires Google en 2011 et 2013.

2.1.1 Méthodologie d'enquête par questionnaire

Deux questionnaires distincts sont envoyés. Un premier questionnaire est envoyé en 2011 à 91 DDT, dont la DRIEE d'Ile-de-France. Les départements d'outre-mer ne sont pas concernés par ce premier questionnaire. 28 DDT répondent au questionnaire qui leur est adressé (Figure 16a). Le deuxième

¹² [Lien du formulaire adressé aux DDT](#)

¹³ [Lien du formulaire adressé aux DREAL](#)

questionnaire est envoyé en 2013 à 27 DREAL, dont la DRIEE d’Ile-de-France. 14 DREAL répondent dont la DREAL de Guadeloupe qui n’est pas représentée sur la Figure 16b. Les questions posées dans le cadre des questionnaires sont disponibles dans les annexes 1 et 2.

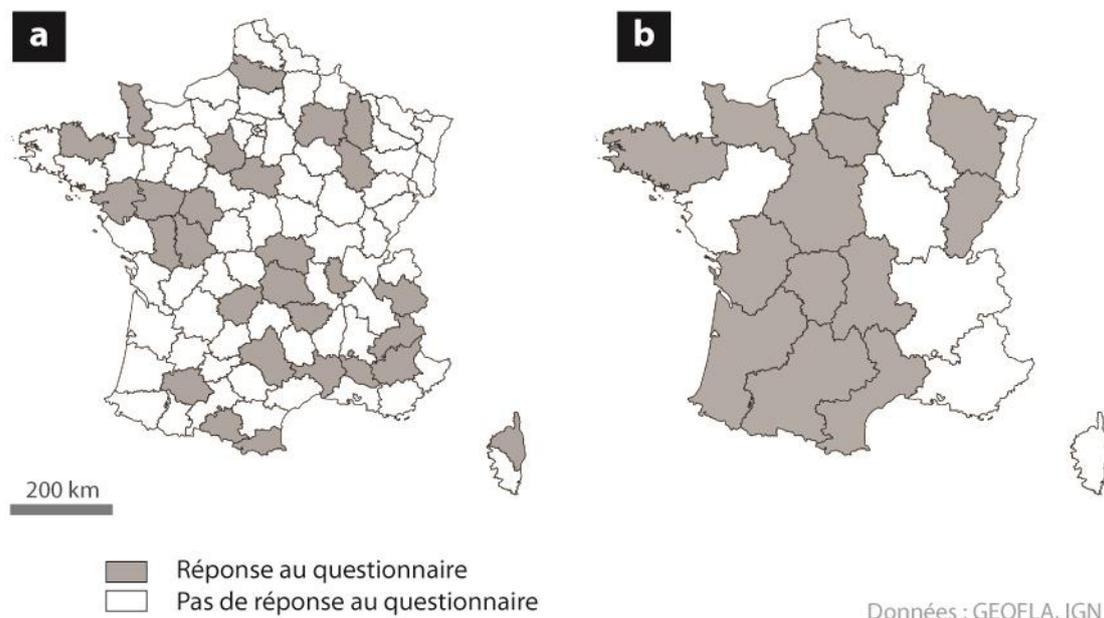


Figure 16 : DDT (a) et DREAL (b) ayant répondu aux questionnaires

Le questionnaire adressé aux DDT comporte 14 questions. Seules six d’entre elles font l’objet d’une représentation graphique ou cartographique. La présentation des autres questions n’est pas pertinente pour ce chapitre. Ce sont des questions hors contexte qui se rapportent notamment au contenu des PPRI. Notons que la question « Avez-vous des Atlas de Zones Inondables dans votre département ? » n’est pas traitée. En effet, lors de la réalisation de ce questionnaire nous pensions qu’un AZI était nécessairement réalisé par approche hydrogéomorphologique. Or certains AZI emploient également des modélisations hydrauliques ou des cartographies de crues historiques. Toutes les DDT ont répondu positivement à cette question qui était donc mal posée. Le questionnaire envoyé aux DREAL comprend 10 questions. Seules trois questions sont prises en compte.

Plusieurs thèmes sont abordés dans les questionnaires. Le premier d’entre eux correspond à des questions ouvertes qui portent sur les atouts et les limites de la cartographie hydrogéomorphologique. Le deuxième thème comprend des questions à choix simple traitant de l’utilisation de l’hydrogéomorphologie dans les PPRI. Ce thème est uniquement adressé aux DDT. Le troisième thème fait référence à la « Directive Inondation » et en particulier à la correspondance entre la cartographie hydrogéomorphologique et la crue extrême demandée par le texte de loi¹⁴. Le quatrième thème correspond à deux questions à choix simple qui portent sur le lien entre l’hydrogéomorphologie et les crues historiques et sur la qualité des cartes produites dans leur région. Enfin, une dernière

¹⁴ Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2007 relative à l’évaluation et à la gestion des risques d’inondation. Journal officiel de l’Union européenne du 06/11/2007.

question à choix simple s'adresse uniquement aux DDT et les interroge sur leur vision du développement à venir de la cartographie hydrogéomorphologique dans leur territoire.

Un point important doit être souligné dans le cadre de cette étude. Une seule personne a répondu pour chaque entité institutionnelle. Nous considérons les réponses fournies comme représentatives des pratiques de l'institution. Pourtant il reste possible que des questions pourraient varier d'un employé à l'autre au sein de la même institution.

2.1.2 Les atouts de l'hydrogéomorphologie

A la question « quels sont selon vous les principaux atouts de la cartographie hydrogéomorphologique ? », sept réponses principales émergent (Tableau 1). Notons qu'un individu peut proposer plusieurs atouts. La somme de toutes les réponses n'est donc pas égale au nombre de répondants. Les réponses sont issues d'une question ouverte. La liste des différents atouts est issue d'une interprétation.

Atouts	DDT (nb sur 28)	DREAL (nb sur 14)	Total (sur 42)
Rapide / Peu cher	13	13	26
Cartographie maximisante des Zones Inondables	9	4	13
Vérifiable sur le terrain / Pédagogique	6	5	11
Complément d'informations sur cours d'eau sans données hydrologiques / Carto. homogène sur un BV	5	4	9
Complément à la modélisation hydraulique	3	4	7
Première vision des zones inondables / Connaissance	4	1	5
Correspondance crue historique	1	2	3

Tableau 1 : Les principaux atouts de la cartographie hydrogéomorphologique selon les services techniques de l'Etat

L'élément le plus souvent cité correspond au fait que la cartographie hydrogéomorphologique est une méthode peu chère et rapide à effectuer. Jusqu'à 13 DREAL sur 14 interrogées mentionnent cet atout, sans doute car elles ont la responsabilité de produire les AZI¹⁵. Les personnes interrogées comparent notamment la cartographie hydrogéomorphologique au coût plus élevé des modélisations hydrauliques.

La représentation d'une enveloppe maximale des zones inondables correspond au deuxième atout le plus cité par les services de l'Etat. Pour 11 répondants sur 42, la possibilité de vérifier la cartographie sur le terrain est un atout majeur. La cartographie possède un aspect pédagogique, notamment lors de

¹⁵ MEDD, 2003. Circulaire relative à la politique de l'Etat en matière d'établissement d'atlas des zones inondables.

visites de terrain avec des élus locaux. Pour neuf des personnes interrogées la cartographie hydrogéomorphologique apporte des compléments pour les « cours d'eau secondaires » ne disposant pas de données hydrologiques. Elle entraîne ainsi une cartographie plus homogène sur des bassins versants entiers.

La complémentarité avec les modélisations hydrauliques est un atout largement mis en avant par les guides ministériels (Garry et Grasz, 1999) et les auteurs traitant de cartographies hydrogéomorphologiques (Garry *et al.*, 2002). Seules 7 personnes sur 42 mentionnent ce point. La DDTM des Pyrénées-Orientales précise que la cartographie hydrogéomorphologique « [...] permet d'avoir un œil critique sur les résultats (issus de modalisations) ». Cinq personnes mentionnent le fait que la cartographie hydrogéomorphologique fournit une première vision des zones inondables. Enfin, trois personnes estiment qu'un des points positifs de la cartographie hydrogéomorphologique est d'avoir pu être validée par une crue historique récente. Les crues citées sont celles de 1995 en Basse-Normandie, la crue du Madon (DREAL Lorraine) et la crue du Thoré (DDT du Gers)

2.1.3 Les limites de l'hydrogéomorphologie

A travers les réponses des services techniques de l'Etat, cinq critiques principales apparaissent à l'encontre de la cartographie hydrogéomorphologique (Tableau 2).

Inconvénients	DDT (nb sur 28)	DREAL (nb sur 14)	Total (sur 42)
Absence de hauteurs d'eau / Cote / Application PPRI	20	7	27
Pas de prise en compte de l'anthropisation	6	5	11
Pas adapté à tous les contextes physiques	6	4	10
Absence de fréquences de crue	1	3	4
Communication AZI	2	0	2

Tableau 2 : Les principales limites de la cartographie hydrogéomorphologique selon les services techniques de l'Etat

Le premier regret au sujet de la cartographie hydrogéomorphologique (27 sur 42) correspond à l'absence de cotes, ou de hauteurs d'eau qui constituent une contrainte pour son utilisation dans des PPRI. Une cartographie hydrogéomorphologique est considérée comme « fragile juridiquement » par la DDTM de Haute-Corse. Mais c'est surtout la cote de référence qui semble « poser des difficultés dans l'application du règlement des PPRI » comme le note la DDTM de Côtes-d'Armor. A la vue de cette première critique, nous serions tentés de conclure que l'on reproche essentiellement à la cartographie hydrogéomorphologique de ne pas produire les mêmes résultats qu'une modélisation hydraulique. Certaines personnes tempèrent leurs propos. Le représentant de la DDT du Puy-de-Dôme explique que « la modélisation hydraulique ne (leur) paraît pas [...] supérieure dans sa représentation

de l'aléa inondation mais (leur) permet une instruction plus aisée des actes d'urbanisme ». Dans un entretien effectué par email (Annexe 3), Hubert Clapet, de la DREAL Basse-Normandie insiste sur « l'effet rassurant des résultats chiffrés », ajoutant que « même si la précision n'est pas meilleure, un calcul hydraulique pèse souvent plus lourd dans les esprits ».

En deuxième position des critiques émises, nous observons la problématique de la prise en compte de l'anthropisation. Cette critique est divisée en deux thèmes. Tout d'abord, le fait que la méthode ne soit pas adaptée pour les portions de cours d'eau très urbanisés. Ensuite nous retrouvons le problème de la non prise en compte des remblais et ouvrages hydrauliques dans la représentation de la zone inondable. Cette critique est recevable, mais notons tout de même qu'un des principes fondamentaux de l'hydrogéomorphologie reste de proposer une vision naturaliste des zones inondables (Ballais *et al.*, 2011; Garry *et al.*, 2002; Masson *et al.*, 1996).

10 personnes sur 42 estiment que la méthode n'est pas adaptée aux caractéristiques physiques de leur territoire ou de certaines portions de cours d'eau. Citons par exemple le représentant de la DDT de Haute-Loire qui précise que l'hydrogéomorphologie est « peu adaptée à (son) territoire ». Le représentant de la DREAL Languedoc-Roussillon précise que les basses plaines et les parties aval des cours d'eau présentent des difficultés d'interprétation. La DDT de la Ardennes estime que la méthode est peu adaptée aux cours d'eau à crues lentes.

Quatre personnes regrettent l'absence de correspondance avec des récurrences de crue. Et enfin deux représentants de DDT considèrent que la cartographie peut engendrer des difficultés de communication. La DDT de la Meuse précise que « la crue hydrogéomorphologique dépasse souvent l'entendement des habitants et des élus [...] ». Dans le Gard, on précise que « la communication autour de la méthode et son acceptabilité (sont) parfois remis en cause ». Lorsqu'elle est utilisée réglementairement l'hydrogéomorphologie peut en effet être sujette à controverses. Ce fut le cas en 2005 lorsque le sénateur du Calvados Ambroise Dupont¹⁶ posa une question au sujet de la valeur réglementaire des AZI de la région Basse-Normandie. Les zones inondables cartographiées par les AZI hydrogéomorphologiques sont qualifiés de « tout à fait improbables ». Cette intervention se fit l'écho du mécontentement des maires du Calvados quant à l'intégration dans les PPRI de la cartographie hydrogéomorphologique par les services instructeurs de l'État. Ce contentieux fut réglé en appliquant plus de nuances dans les zonages réglementaires (Montané, 2013).

2.1.4 Utilisation de l'hydrogéomorphologie pour les PPRI

La difficulté d'intégrer une cartographie hydrogéomorphologique au sein d'un PPRI est largement regrettée par les services de l'Etat. Nous tentons de préciser la manière dont est utilisée l'hydrogéomorphologie dans ces documents réglementaires grâce à deux questions fermées (Figure 17). 15 DDT sur 28 précisent qu'elles utilisent la cartographie dans le cadre de PPRI (Figure 17a). Ce type de question ne permet cependant pas de déterminer de quelle manière celle-ci est prise en compte.

¹⁶ Sénat. Séance du 8 mars 2005 (compte-rendu intégral des débats). Question de Serge Lepeletier. <http://www.senat.fr/seances/s200503/s20050308/s20050308002.html#Q8>

Elle pourrait tout autant être uniquement consultée avant une modélisation hydraulique, comme être intégrée dans le zonage règlementaire. Il existe dans le Sud de la France, une pratique qui consiste à nommer « aléa résiduel » l'espace compris entre la limite externe de la crue de référence et celle du lit majeur (Vinet, 2010). Nous demandons aux DDT si elles emploient ce terme (Figure 17b). Les réponses montrent que seuls les départements de l'arc méditerranéen, la Haute-Corse et le département du Rhône sont concernés par ce concept.

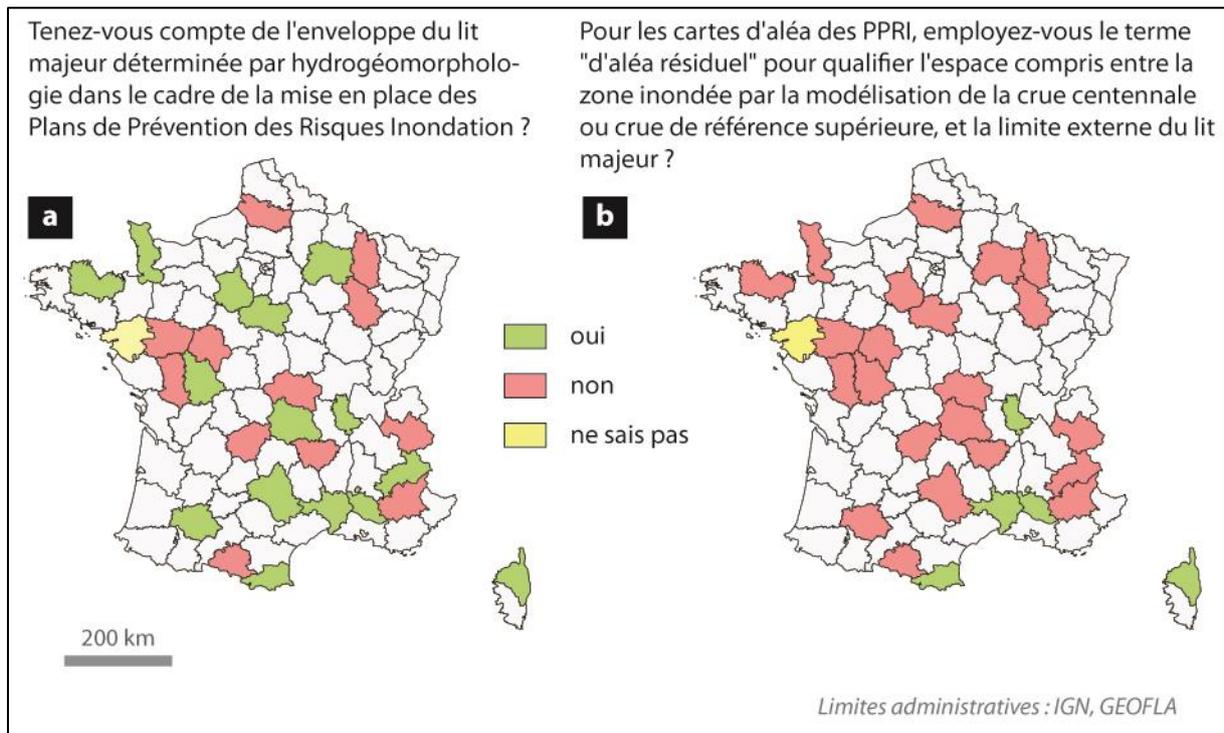


Figure 17 : Représentation cartographique de questions relatives à l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI

Dans la perspective d'approfondir la représentation de l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI, nous proposons aux DDT de préciser ce que comprend l'aléa résiduel. La question ouverte suivante est posée : « Cet aléa résiduel est-il habituellement associé à des préconisations en termes de règles d'urbanisme, de réduction de la vulnérabilité ou autre ? ».

Les DDT des Pyrénées-Orientales, du Gard et du Vaucluse mentionnent des prescriptions sur la hauteur du premier plancher par rapport au terrain naturel (TN) pour les zones d'aléa résiduel. Le représentant de la DDT du Rhône explique que l'aléa résiduel entraîne une interdiction des établissements sensibles aux inondations.

2.1.5 La crue de faible probabilité de la « Directive Inondation »

La « Directive Inondation » demande de cartographier une crue de faible probabilité ou crue extrême. Dans le but de connaître l'avis des services de l'Etat au sujet de la méthode employée pour représenter cette crue, nous posons deux questions distinctes (Figure 18). Nous posons en 2011 une question ouverte aux DDT (Figure 18a). Une majorité de DDT ne sait pas quelle méthode sera retenue pour la cartographie de la crue extrême. Notons que les cinq DDT qui indiquent utiliser le concept d'aléa résiduel penchent également pour une utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique pour la représentation de la crue extrême. Seules deux DDT estiment que la crue extrême pourrait être déterminée grâce à une étude hydrologique.

Pour les DREAL, la question posée en 2013 est à choix simple (Figure 18b). 7 DREAL sur 14 estiment que le lit majeur correspond au contour de la crue de faible probabilité. Quatre DREAL (dont la Guadeloupe, non représentée) pensent le contraire. Trois DREAL ne se prononcent pas.

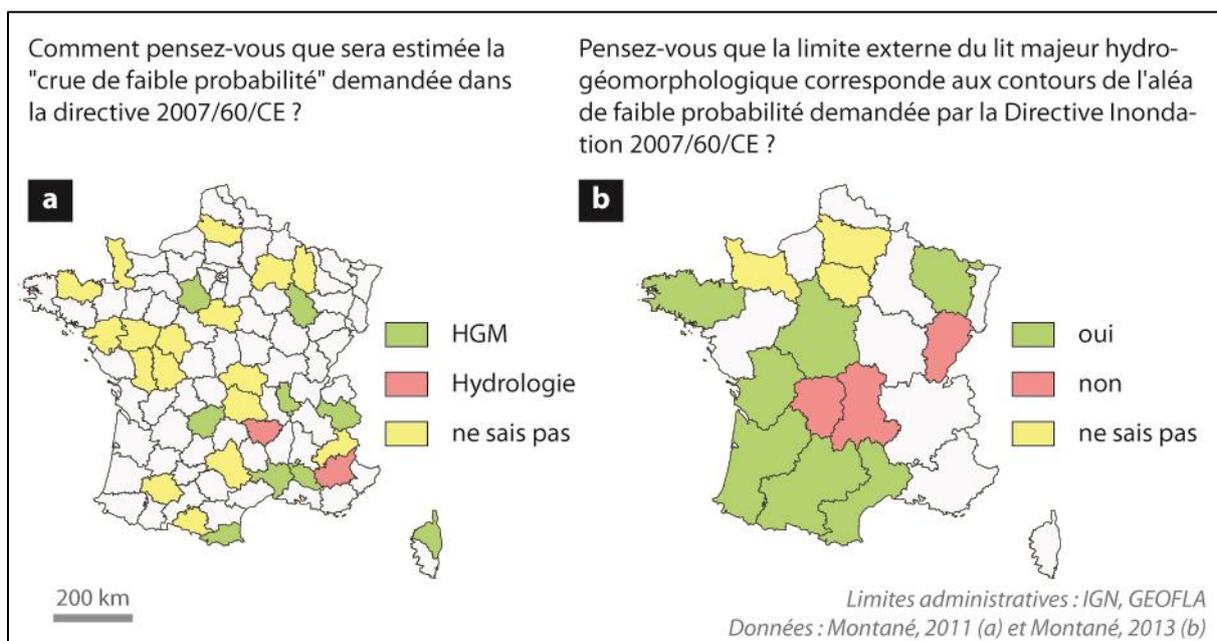


Figure 18 : Représentation cartographique de questions relatives à la crue de faible probabilité de la « Directive Inondation »

Les DREAL affichent une plus grande confiance que les DDT en la cartographie hydrogéomorphologique, pour être employée dans le cadre de la « Directive Inondation ». Mais il convient de noter que l'intitulé et le type de question sont différents. Ensuite il persiste un décalage dans le temps entre les deux questions. L'avis des DDT a pu évoluer dans le temps au gré des communications du ministère à ce sujet.

2.1.6 Perspectives de développement de la cartographie hydrogéomorphologique

Une dernière question posée aux DDT concerne le développement futur de la cartographie hydrogéomorphologique. Nous leur demandons s'ils pensent que la méthode est amenée à se développer dans leur territoire (Figure 19). 15 représentants de DDT sur 24 estiment que la cartographie hydrogéomorphologique va se développer dans leur département.

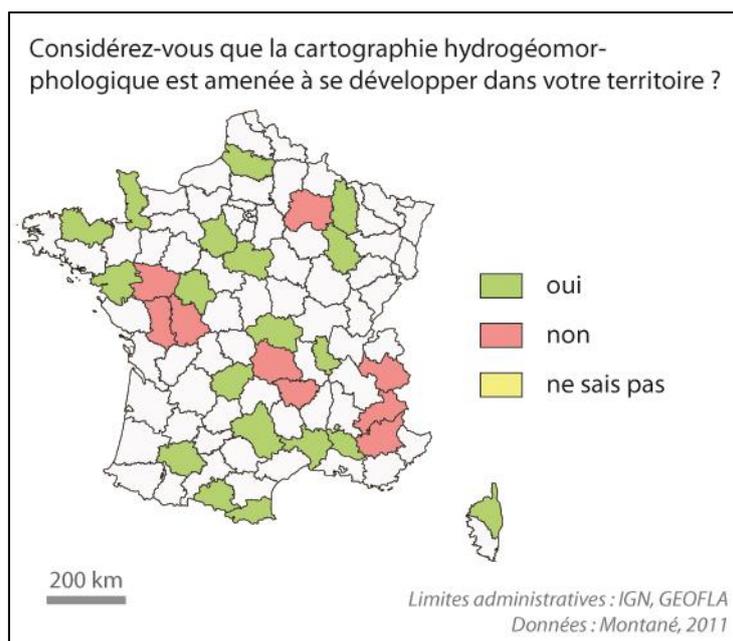


Figure 19 : Représentation cartographique d'une question relative au développement futur de la cartographie hydrogéomorphologique

2.2 Les liens entre les AZI hydrogéomorphologiques et les PPRI

L'élaboration d'un PPRI fait l'objet d'un inventaire des données de l'aléa inondation disponibles, dont font partie les AZI. Le type de méthode utilisée pour les AZI influence les méthodologies retenues dans le cadre du PPRI. Par exemple les PPRI du département du Nord emploient tous comme aléa de référence la crue centennale modélisée pour l'Atlas des Zones Inondables du Nord-Pas-de-Calais. Les cartes d'aléa des PPRI de la région Midi-Pyrénées sont directement issues de la CIZI (Cartographie Informatrice des Zones Inondables) produites par la DREAL. De ce fait, si des AZI hydrogéomorphologiques sont disponibles, ils sont également utilisés dans les PPRI. Mais avant d'étudier de manière plus globale l'emploi de la cartographie hydrogéomorphologique dans un échantillon de 282 PPRI, il est nécessaire de définir en quoi l'hydrogéomorphologie est utile pour la réalisation de PPRI.

Trois cas de figure sont identifiables, en fonction de deux paramètres : la disponibilité d'AZI hydrogéomorphologique au moment du PPRI et la « compétence hydrogéomorphologique » de la personne qui réalise la carte d'aléa.

2.2.1 1^{er} cas de figure : l'AZI hydrogéomorphologique est disponible

La disponibilité d'un AZI hydrogéomorphologique avant la réalisation d'un PPRI présente plusieurs atouts. Tout d'abord, cela procure une vision de l'ensemble de la zone inondable. Celle-ci permet de placer de manière efficace les profils en travers du modèle hydraulique. Les informations telles que la forme de la zone inondable ou les figurés linéaires relatifs à l'hydrodynamisme permettent d'anticiper le comportement de la crue modélisée. Lors de la commande des profils en travers au géomètre, il n'est ainsi pas nécessaire de choisir une extension de profils en travers trop large, mais simplement de prendre une légère marge de sécurité par rapport à l'extension du lit majeur. Cette démarche est illustrée par la Figure 20 qui représente un extrait du positionnement des profils en travers du modèle hydraulique à réaliser pour le PPRI du Fiumorbo et de l'Abatesco pour la DDTM de Haute-Corse.

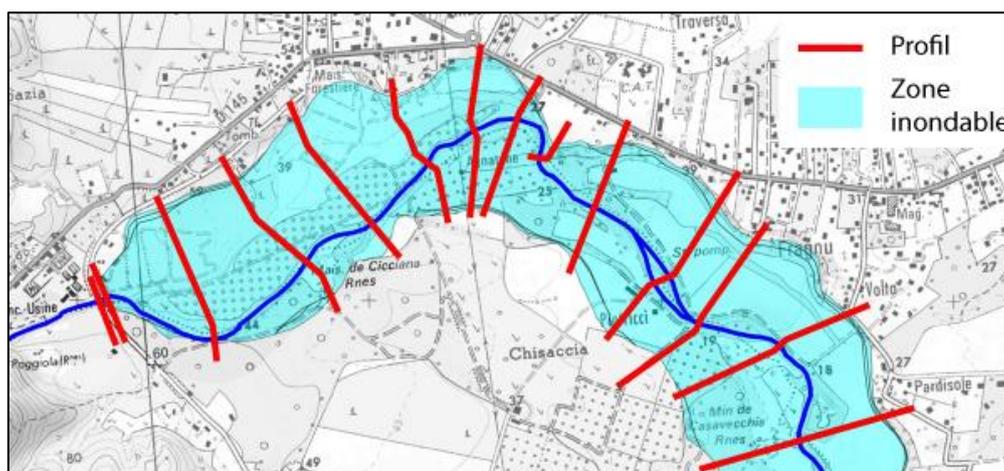


Figure 20 : Positionnement des profils en travers pour le PPRI du Fiumorbo et de l'Abatesco
(Source : BURGEAP, 2013 ; DREAL Corse)

Un autre intérêt de la disponibilité d'un AZI hydrogéomorphologique est de produire une cartographie d'aléa homogène sur tout un bassin versant et de compléter la cartographie sur les petits affluents sur lesquels aucune modélisation n'est réalisée. De plus la cartographie hydrogéomorphologique préexistante permet d'éviter que celle-ci soit réalisée uniquement sur les parties non urbanisées. Au contraire, Le PPRI de la Cèze (30) approuvé en 2011 illustre bien comment le bureau d'étude Egis Eau a repris la cartographie hydrogéomorphologique issue de l'AZI réalisé par H2GEAU en 2003 (Figure 21). Notons que seule la fusion des unités de la zone inondable apparaît sur la cartographie de l'aléa.

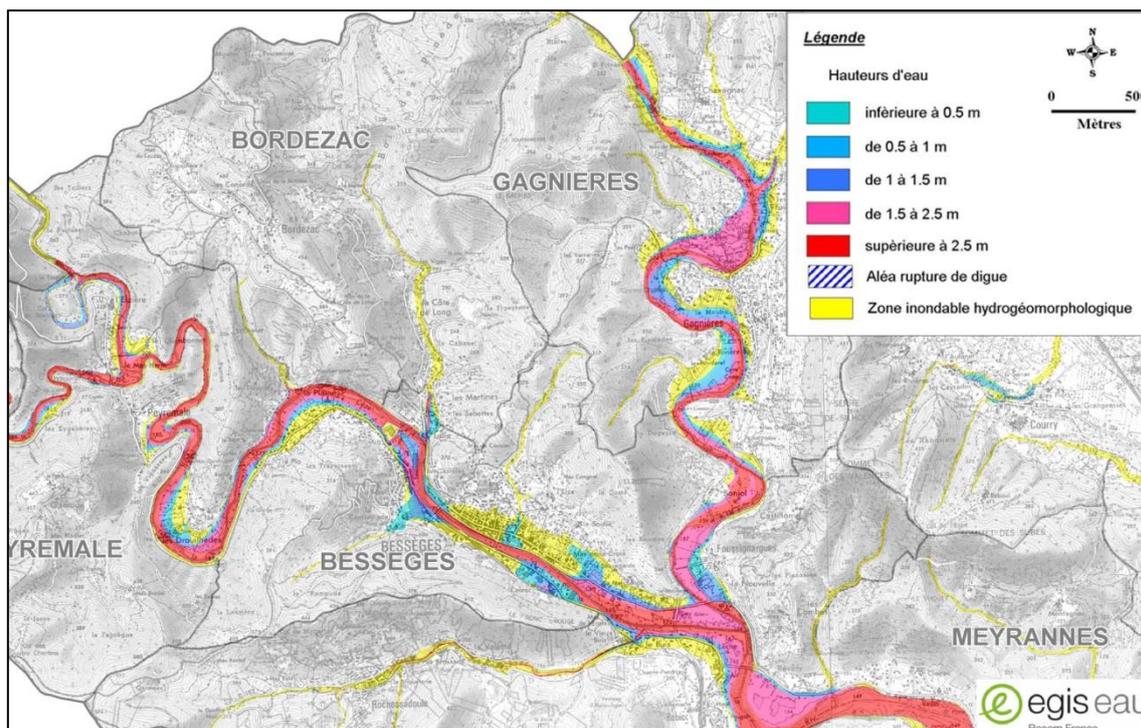


Figure 21 : Extrait de la cartographie de l'aléa du PPRI de la Cèze. (Source : DDTM du Gard, 2011)

La vérification de la cartographie hydrogéomorphologique par le bureau d'étude en charge du diagnostic de l'aléa reste tout de même indispensable, en partie grâce à des visites de terrain.

2.2.2 2^{ème} cas de figure : l'AZI hydrogéomorphologique n'est pas disponible

S'il n'existe pas d'AZI hydrogéomorphologique lors de la réalisation d'un PPRI, les services de l'Etat peuvent demander à ce qu'une cartographie soit réalisée spécifiquement pour l'étude. Cette situation se retrouve dans le cadre de la réalisation du PPRI de l'Ibie sur les communes de Villeneuve-de-Berg. Ce PPRI a fait l'objet d'une commande à BURGEAP de la part de la DDT de l'Ardèche. Elle comprend la réalisation d'une cartographie de l'aléa inondation qui combine des modélisations hydrauliques de la crue centennale dans les parties urbaines et une cartographie hydrogéomorphologique sur tout le linéaire. Ainsi que nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, le département de l'Ardèche est concerné par la circulaire interministérielle de 2004 imposant de prendre en compte l'hydrogéomorphologie pour la réalisation de PPRI. Mais contrairement à ses voisines méridionales (régions Languedoc-Roussillon et PACA), la DREAL de la région Rhône-Alpes n'a pas lancé de campagne de réalisation d'AZI hydrogéomorphologiques sur des bassins versant entiers. Les DDT se retrouvent donc dans l'obligation d'utiliser une donnée qu'elles ne possèdent pas.

Sur le plan méthodologique, la réalisation de la carte d'aléa est similaire à celle de la Cèze. Le linéaire traité est toutefois plus faible, tout comme les zones qui font l'objet d'une modélisation hydraulique (Figure 22).

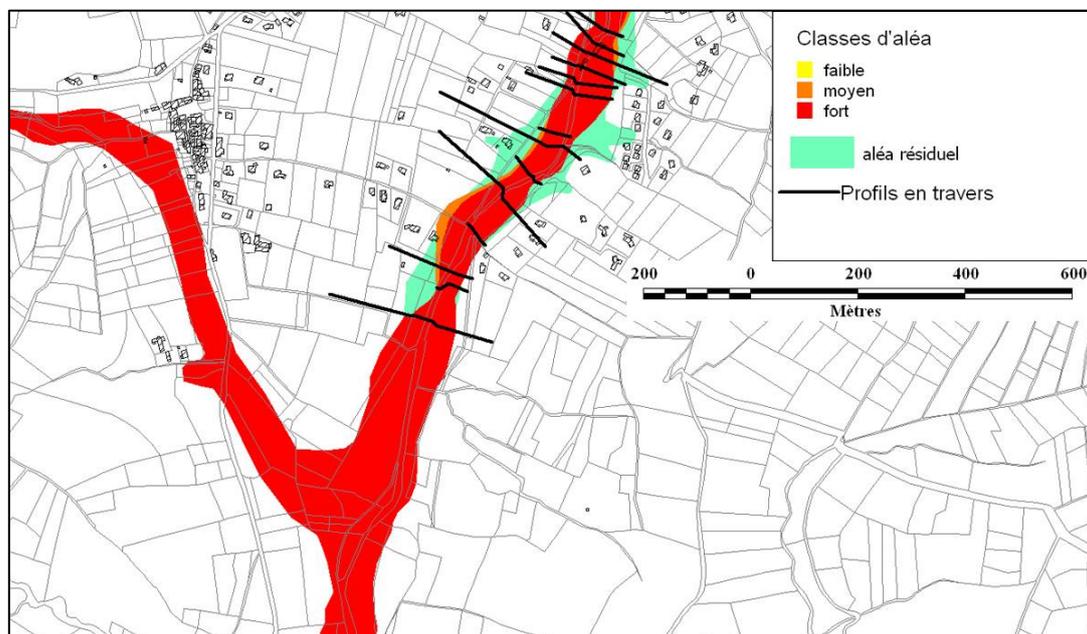


Figure 22 : Extrait de la cartographie de l'aléa pour le PPRI de l'Ibie (source : BURGEAP, 2013)

Un point négatif majeur de ce mode de réalisation de PPRI reste que la cartographie hydrogéomorphologique n'est pas diffusée à la suite de l'étude. Seule le zonage réglementaire du PPRI est diffusé par la DDT, voire la cartographie de l'aléa. C'est une perte d'informations pour les futures études.

2.2.3 3^{ème} cas de figure : l'AZI hydrogéomorphologique n'est pas disponible et la compétence hydrogéomorphologie n'est pas maîtrisée

Le département de l'Hérault, à l'instar des autres départements de la région Languedoc-Roussillon, est largement couvert par des AZI hydrogéomorphologiques. Mais il n'en a pas toujours été ainsi. Le 23 décembre 2002, alors que la DDTM de l'Hérault prescrit le PPRI du « Bassin versant Nord de l'étang de l'Or¹⁷ », l'AZI hydrogéomorphologique sur les cours d'eau concernés n'existe pas encore. Le rapport de présentation du PPRI qui accompagne son approbation du 18 mars 2004 mentionne que le diagnostic de l'aléa fait l'objet de modélisations hydrauliques dans les sections urbaines et d'une interprétation hydrogéomorphologique dans les zones sans enjeux. Le PPRI concerne notamment la commune de Castries, traversée par la Cadoule.

¹⁷ DDE de l'Hérault, 2004. Plan de Prévention des Risques Naturels d'Inondation. Bassin versant Nord de l'étang de l'Or. Note de présentation. 28 p.

En 2012, la DREAL Languedoc-Roussillon mandate BURGEAP pour réaliser l'AZI hydrogéomorphologique des cours d'eau se jetant dans les étangs côtiers de la région. La Cadoule, cours d'eau de 23 km situé à l'est de Montpellier et débouchant dans l'étang de l'Or, fait justement partie des cours d'eau à cartographier dans le cadre de l'Atlas.

La Figure 23 compare le zonage réglementaire du PPRI de Castries et la zone inondable déterminée dans le cadre de l'AZI. Les zones inondables de la Cadoule sur le territoire de Castries se caractérisent par une largeur de près de 150 m en amont, par un secteur en gorge dans la totalité de la traversée urbaine de la ville, puis d'un nouvel élargissement en aval. Les principales différences entre l'AZI et le PPRI se situent dans les zones d'élargissement amont et aval, où le PPRI est jusqu'à deux fois plus large. Ces zones sans enjeux correspondent aux secteurs où une interprétation hydrogéomorphologique est prévue selon le rapport du PPRI de l'étang de l'Or. Dans le secteur urbanisé, les deux cartographies sont sensiblement identiques.

Les visites de terrain, qui sont d'usage lors de la réalisation d'un AZI nous permettent de mettre en avant les erreurs de cartographie. La Photographie 5a montre la limite de zone inondable caractérisée dans ce secteur par un contact entre un lit majeur, occupé par une prairie, et le versant constitué de roche calcaire apparente recouverte d'une végétation caractéristique de la garrigue (pins, chênes verts). Le PPRI s'étend au-delà de la limite de zone inondable délimitée par ces deux unités morphologiques provenant de l'AZI.

La Photographie 5b illustre la présence d'une station d'épuration au sud de la ville. Cette station est bâtie sur une portion de garrigue située près de 4 m au-dessus du lit majeur, pourtant très largement en zone rouge. Ce PPRI met en évidence les erreurs caractéristiques de personnes visiblement non formées à la cartographie hydrogéomorphologique. Les zones inondables cartographiées sont exagérément larges et traduisent une application forcée du principe de précaution.

Cet exemple met en exergue à quel point la disponibilité d'un AZI hydrogéomorphologique au moment la réalisation d'un PPRI reste un atout. Dans l'exemple du PPRI de Castries, la nécessité de réaliser une cartographie hydrogéomorphologique dans les zones sans enjeux a entraîné des erreurs.

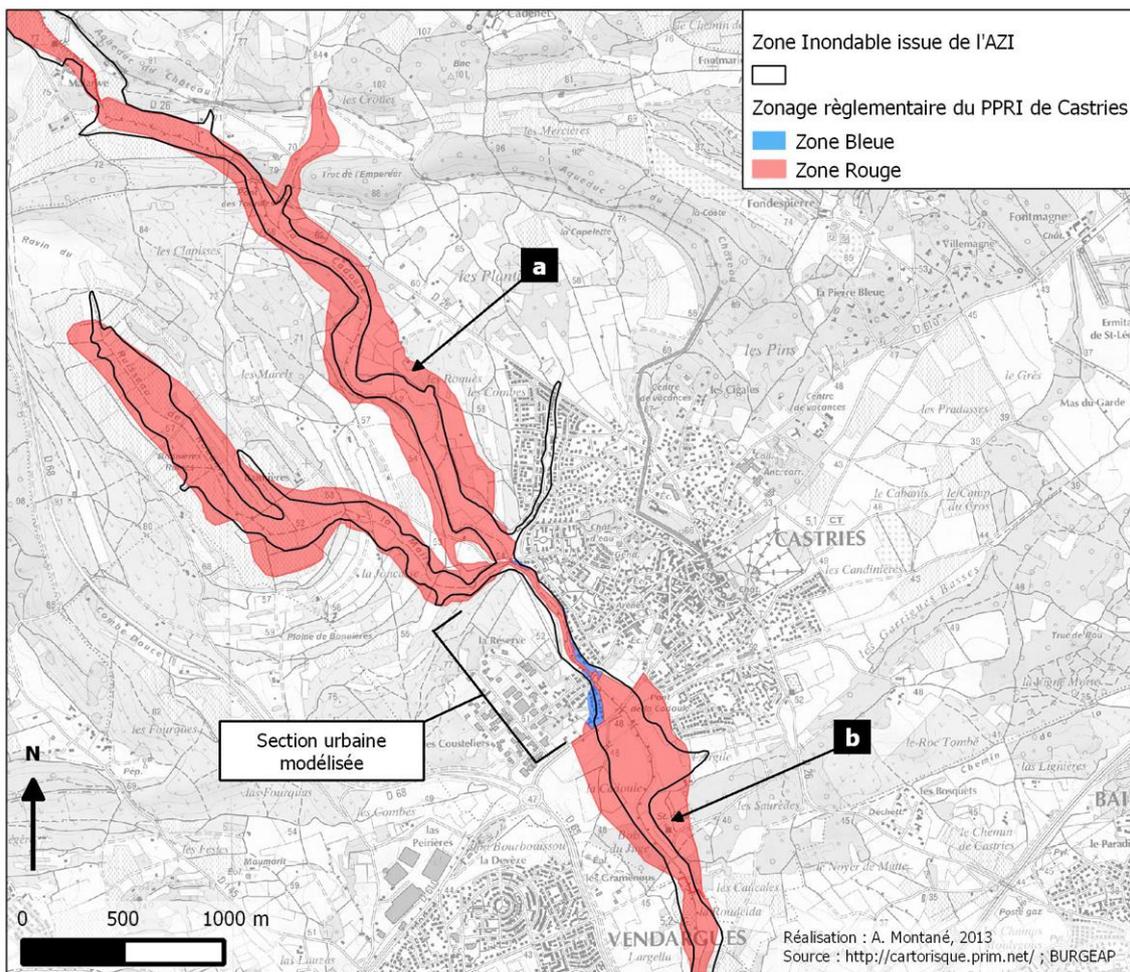


Figure 23 : Cartographie du PPRI de Castries (34) et de la zone inondable hydrogéomorphologique



Photographie 5 : (a) Contact entre le versant et le lit majeur en amont de Castries ; (b) station d'épuration de Castries

2.3 Analyse des PPRI et de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique

Conformément aux guides méthodologiques publiés par les ministères en charge des risques (Garry et Graszka, 1999), les PPRI doivent faire l'objet d'une cartographie de l'aléa fondée sur une crue de référence de récurrence centennale ou sur une crue historique supérieure. Le ministère insiste également sur l'intégration de méthodes qualitatives telles que la cartographie hydrogéomorphologique pour des raisons budgétaires, mais également pour apporter une vision complémentaire à l'hydraulique. Cette volonté de donner un rôle plus important à la cartographie hydrogéomorphologique est notamment visible avec la circulaire de 2004 à destination de territoires du Midi Méditerranéen¹⁸.

Comment cette volonté s'est-elle traduite dans les faits ? Quelles logiques spatiales et temporelles apparaissent ? Peut-on relier ces logiques avec d'autres caractéristiques des PPRI ? Est-il possible de faire émerger une typologie des usages réglementaires liés à l'hydrogéomorphologie ? Les réponses apportées à ces questions visent à fournir une vision globale de pratiques locales développées dès le début des années 2000.

2.3.1 Méthodologie

Cette méthodologie (Figure 24) s'inspire du travail effectué en 2003 (Monge *et al.*, 2003) et qui a pour objectif d'évaluer la qualité des PPRI approuvés. Cette étude débute par une première phase de recueil de PPRI sur 400 communes grâce à des entretiens avec les services de l'Etat et à la consultation de la base CORINTE (prédécesseur de la base GASPAR). Les PPRI sont analysés grâce à une grille d'analyse centrée sur le contenu des rapports de présentation, du zonage réglementaire et du règlement. L'étude met en avant une typologie des mesures réglementaires, mais aussi des constats importants. Citons par exemple le constat de la grande hétérogénéité des PPRI, ainsi que le manque de pièces graphiques systématiques. Notre travail diffère de l'analyse des PPRI effectuée en 2003 (Monge *et al.*, 2003) par la focalisation sur le diagnostic de l'aléa et en particulier sur l'hydrogéomorphologie. Le nombre de PPRI approuvés a par ailleurs plus que doublé depuis 10 ans et la diffusion et le référencement des PPRI s'est grandement amélioré grâce à la base GASPAR.

¹⁸ Circulaire du 21/01/04 relative à la maîtrise de l'urbanisme et adaptation des constructions en zone inondable. BOMEDD n°15 du 15 août 2004

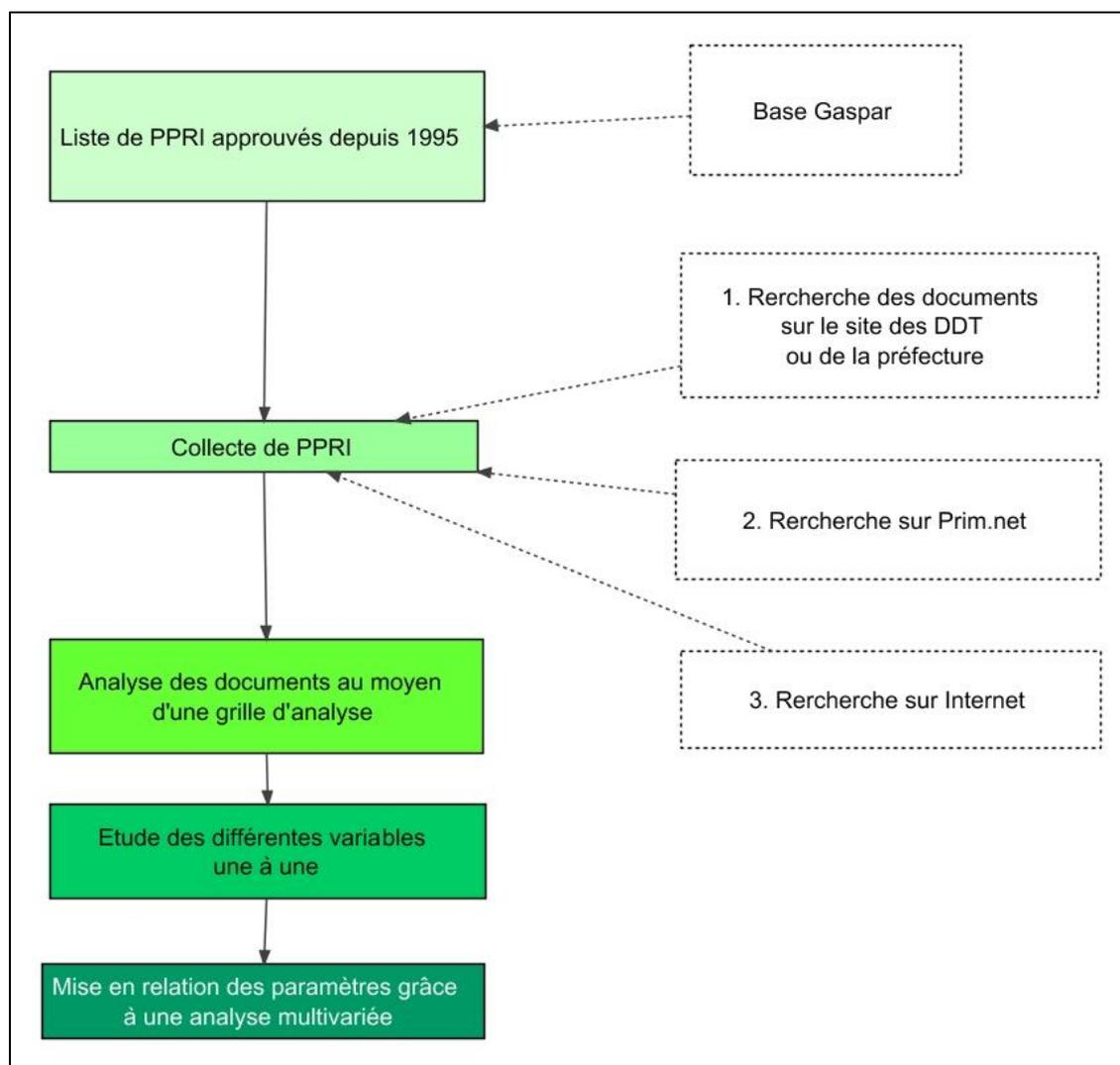


Figure 24 : Méthodologie de collecte et de traitement des PPRI

La première étape de notre méthodologie consiste à établir une liste des PPRI approuvés depuis 1995. Pour cela nous utilisons la base GASPARG¹⁹, disponible gratuitement sur Internet sous la forme d'une base de données Microsoft Access, régulièrement mise à jour. Cette base de données vise au premier abord à recenser les arrêtés de catastrophe naturelle à l'échelle de la France (Douvinet et Vinet, 2012). Elle fournit aujourd'hui de nombreuses informations (AZI, PCS, arrêtés CatNat, PPRI, ...). Nous filtrons les données disponibles pour ne garder que les PPRI approuvés depuis 1995 et qui concernent l'aléa inondation. A ce stade, nous possédons une base de données qui contient les informations suivantes :

- code communal,
- nom de la commune,
- nom du cours d'eau,
- code du département,
- date de prescription,

¹⁹ <http://macommune.prim.net/gaspar/>

- date d'approbation.

A noter que les informations fournies peuvent présenter des redondances et nécessitent une lecture critique des informations. Après comparaison avec les rapports, les données se révèlent d'une bonne précision, mise à part le nom du PPRI qui peut différer de celui indiqué sur le rapport méthodologique.

La liste des PPRI établie, nous nous lançons à leur recherche. Nous choisissons pour des raisons d'organisation de traiter les PPRI par département et par ordre alphabétique (Ain, Aisne, Allier...). La première étape consiste à visiter le site Internet de la DDT ou sur le site de la préfecture, si celui-ci n'existe pas. Ensuite, nous consultons la base de données du site Cartorisque²⁰ qui propose de diffuser à la place des DDT de nombreux documents tels que des PPRI ou des AZI. Enfin, pour les PPRI qui ne se trouvent ni sur le site des services de l'Etat, ni sur le site Cartorisque, nous lançons des recherches directement sur Google, en nous basant sur la liste établie depuis la base GASPARE. Lors de la collecte des PPRI, le document indispensable à la poursuite de l'étude est le rapport méthodologique (ou de présentation). Celui-ci contient toutes les informations relatives au diagnostic de l'aléa. Les règlements, les cartographies de zonage réglementaire, ainsi que les cartographies de l'aléa inondation sont également collectés si disponibles.

L'analyse des PPRI nécessite de compléter la base de données Access déjà établie avec de nouvelles informations contenues dans les rapports méthodologiques. Les variables collectées sont :

- le type d'aléa de référence,
- le nombre de communes concernées par le PPRI,
- l'année de la crue historique de référence (si supérieure ou égale à Q100),
- le type d'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique,
- le bureau d'étude mandaté pour le diagnostic de l'aléa (si disponible),
- le mode de diffusion du rapport,
- des commentaires sur les éventuelles spécificités du PPRI.

Les variables et leurs modalités sont ensuite analysées une à une au moyen de cartographies et de graphiques analytiques, afin d'exposer leurs différentes caractéristiques. La dernière étape consiste en une Analyse des Correspondances Multiples (ACM). Elle permet de mettre en relation les variables, d'obtenir une vision synthétique et d'aboutir à une typologie des méthodes de diagnostic de l'aléa employées dans les PPRI.

2.3.2 Les documents récoltés

Les rapports de PPRI récoltés sont au nombre de 282, ce qui correspond à près de 3500 communes. Selon la base GASPARE, en 2012, près de 7400 communes sont couvertes par un PPRI. Notre échantillon est donc proche de la moitié des PPRI approuvés au moment de l'étude. La répartition géographique des documents est homogène (Figure 25), seuls des départements du Sud-Ouest et du Sud-Est manquent. Il existe une distinction importante à comprendre concernant les PPRI. Pour les

²⁰ <http://cartorisque.prim.net/dpt/>

cartographies et les diagrammes, les valeurs représentent les communes. Un PPRI concerne la plupart du temps plusieurs communes. L'analyse statistique qui conclut cette étude repose quant à elle sur les rapports de PPRI eux-mêmes (282). Dans l'analyse, il sera précisé à chaque fois si les résultats concernent les communes couvertes (3500 au total) ou bien les PPRI eux-mêmes.

Dans la pratique il s'avère que le terme PPRI constitue un métonyme qui renvoie au zonage réglementaire. C'est le document qui reste diffusé *a minima*. Le rapport méthodologique est tout de même souvent diffusé. Dans le cadre de notre étude, nous ne choisissons que les PPRI pour lesquels le rapport est disponible. Mais c'est surtout la cartographie de l'aléa qui fait défaut ; seuls 75 PPRI sur 282 sont accompagnés d'une cartographie de l'aléa.

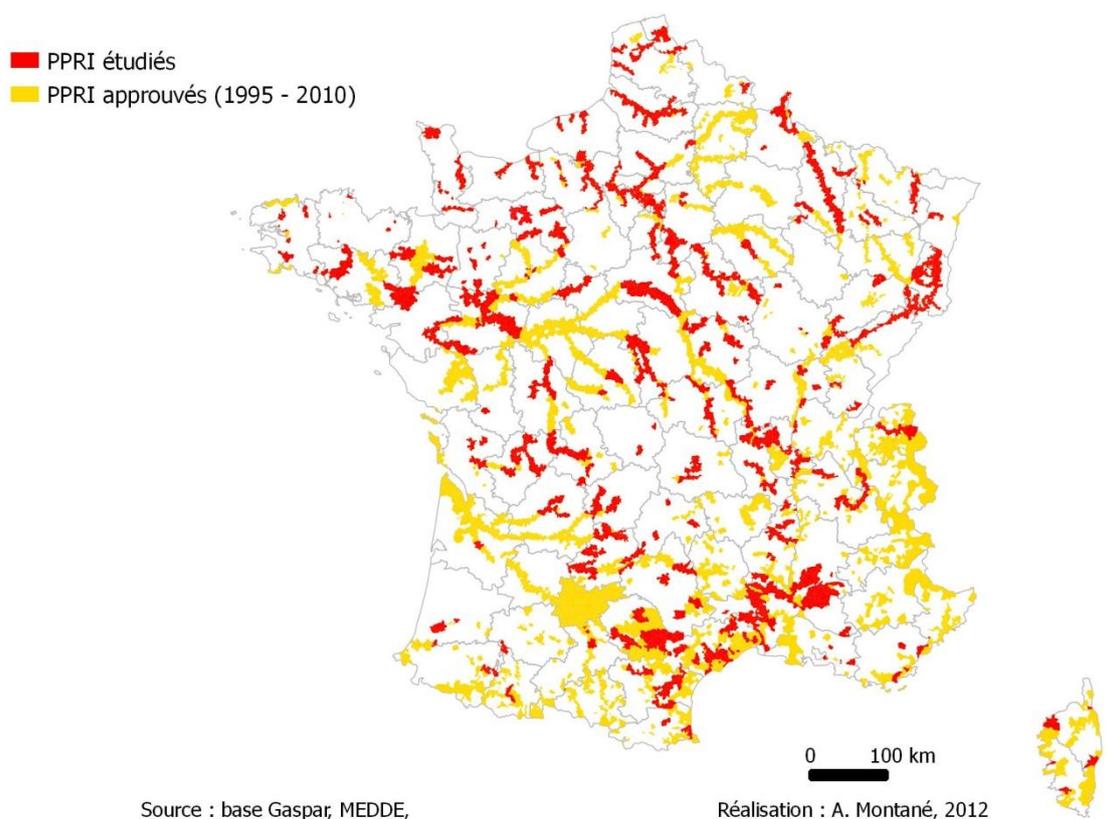


Figure 25 : Les rapports de PPRI récoltés

2.3.2.1 Contenu d'un rapport de présentation de PPRI

Les éléments abordés par le rapport de présentation d'un PPRI font l'objet d'une standardisation nationale mise en avant par le guide méthodologique publié en 1999 par le METLTM (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer) et le MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable). Quatre principales parties sont identifiables.

La première partie est une introduction qui rappelle les différentes lois et décrets sur lesquels s'appuient les PPRI. C'est bien souvent l'occasion pour les services de l'État de justifier la mise en place des PPRI par la réalité que constituent les inondations pour la ou les communes concernées. Un

bref rappel des inondations récentes qui ont marqué le territoire, mais également les inondations de portée nationale telles que celles de l'Ouvèze (1992), de l'Aude (1999) ou encore du Gard (2002), sert à prouver l'intérêt du PPRI.

S'ensuit une présentation du contexte physique et humain du territoire concerné. A des informations générales sur le climat, l'occupation du sol, voire la géologie, succède un état des lieux de données de crues historiques et une synthèse hydrologique.

La partie qui concerne la représentation de l'aléa est celle qui nous apporte le plus d'informations pour notre analyse. Il y est question de la méthodologie employée pour le diagnostic de l'aléa, comme des modélisations hydrauliques, dont la description varie d'un PPRI à l'autre. En effet, si dans certains PPRI sont énoncés le type de modèle (1D, modèle à casiers), le nombre de profils voire même le nom du logiciel utilisé, dans d'autres documents il est simplement question « d'un modèle hydraulique », sans autre détail. On note toutefois que les explications concernant les modélisations se font de plus en plus précises. La représentation de l'aléa est aussi l'occasion de mentionner si la cartographie hydrogéomorphologique est utilisée dans le cadre du PPRI. Il est important de noter que la terminologie est susceptible de changer d'une région à l'autre. Par exemple, dans les départements du Midi méditerranéen, familiers de la méthode, il est question de cartographie ou « d'approche hydrogéomorphologique », tandis que dans des régions moins familières avec la méthode, les PPRI font référence à une « approche géomorphologique », comme dans le PPRI de la Vallière (DDT du Jura, 2006). La caractérisation de l'aléa se termine souvent par une phrase ou un paragraphe succinct qui expose quelle est la crue de référence choisie dans le cadre du PPRI, soit une crue centennale ou une crue historique.

La dernière partie du rapport, concerne le zonage règlementaire. Il y est notamment mentionné la méthodologie employée pour effectuer la transition entre la cartographie de l'aléa et des zones règlementant l'urbanisme. Le règlement du PPRI qui détaille les interdictions et les prescriptions de chacune des zones constitue un autre document.

2.3.2.2 Evolution de la qualité graphique des documents

En 2003 lors de la publication du rapport d'évaluation des PPRI (Monge *et al.*, 2003), une différence en terme de qualité graphique des rapports et des cartes était visible entre les PPRI de première génération et les plus récents. Depuis 10 ans l'écart s'est encore creusé.

L'évolution de la qualité des documents se matérialise notamment avec la fin des rapports scannés, qui rendaient la lecture difficile, mais aussi par l'utilisation systématique de la couleur dans les cartographies qui permet une meilleure compréhension des phénomènes (Figure 26). Cette amélioration du rendu cartographique doit être directement reliée à l'essor des logiciels de SIG.

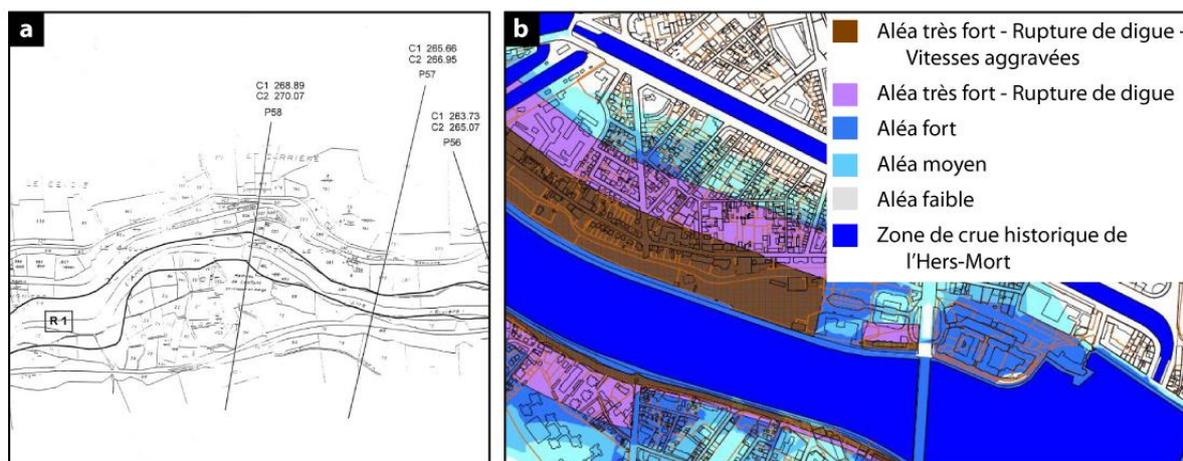


Figure 26 : Cartographie de l'aléa inondation (a) du PPRI de l'Arre inférieure²¹ et de la Garonne à Toulouse²²

2.3.3 Descriptions des variables et de leurs modalités

La base de données utilisée pour l'analyse des PPRI comprend six variables descriptives fournies par la base Gaspar et six variables d'analyse issues de la lecture des rapports de présentation (Tableau 3). Il est possible d'ajouter les commentaires divers issus de la lecture des PPRI qui peuvent être considérés comme une variable. La base de données produite est visible dans l'annexe 4.

Variables descriptives	Variables d'analyse
Code INSEE de la commune	Code PPRI ²³
Nom du cours d'eau	Source du document
Libellé de la commune	Nombre de communes concernées par le PPRI
Code du département	Type d'aléa de référence
Année de prescription du PPRI	Année de crue historique de référence
Année d'approbation du PPRI	Utilisation de la cartographie HGM

Tableau 3 : Les variables constitutives de l'analyse

²¹ DDE du Gard, 1998. Plan de Prévention des Risques. Note de Présentation. Arre inférieure. Communes de Molières-Cavaillac, Avèze et Le Vigan. Nîmes. 20 p.

²² DDT de la Haute-Garonne, 2011. Plan de prévention du risque d'inondation de la ville de Toulouse. Notice de présentation. 93 p.

²³ Ce code est construit sur le modèle : « code département »_« numéro (1 ; +∞). Exemple : 01_1, pour le premier PPRI de l'Ain étudié

2.3.3.1 Période d’approbation et de prescription

La réalisation d’un PPRI débute par sa prescription grâce à un arrêté préfectoral. L’approbation du PPRI par un nouvel arrêté préfectoral marque la fin de la réalisation du PPRI. La Figure 27 présente le nombre de prescriptions et d’approbations des PPRI étudiés par année. Le nombre de prescriptions connaît un pic au début des années 2000, en particulier en 2001 avec 776 prescriptions. Les approbations connaissent leur maximum (470) pour l’année 2005. Le décalage de cinq ans entre les deux distributions est confirmé par le calcul de la durée moyenne d’instruction des PPRI étudiés, qui est de quatre ans et demi. 50 % des PPRI sont approuvés en moins de quatre ans. L’analyse complète de la base Gaspar (Gerin, 2011) confirme notre observation, puisque 60 % des PPRI sont approuvés en moins de quatre ans. A noter que la baisse du nombre d’approbations est explicable en partie par un biais dans la fourniture de données que nous analysons par la suite. Les nombreuses prescriptions de 2000, 2001 et 2002 étaient liées à la mise en place de la réglementation sur la modulation de franchise et d’autre part aux nombreuses inondations qui ont marqué les esprits à l’époque (Aude en 1999, Somme en 2001 et Gard 2002).

Quelques documents possèdent une date de prescription bien antérieure à 1995 et à la « loi Barnier » instituant les PPR. Ce sont des PER dont l’instruction s’est étalée dans le temps et dont l’appellation, en raison de l’évolution de la législation a été modifiée. C’est le cas par exemple du PER de l’Huveaune prescrit en 1985 et approuvé en tant que PPRI en 1999²⁴.

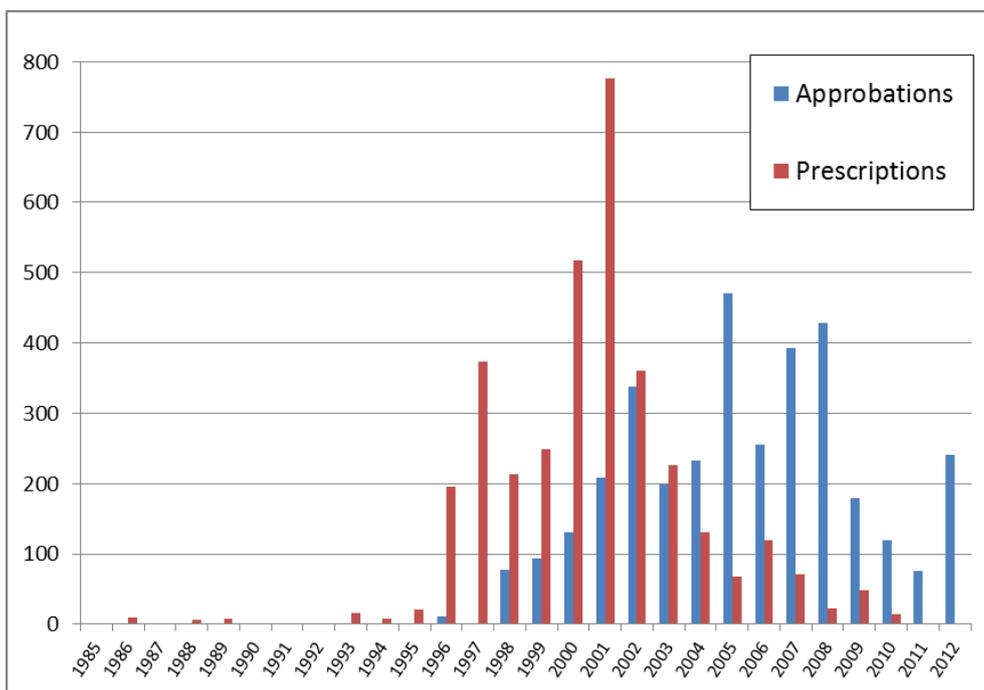


Figure 27 : Répartition chronologique des prescriptions et approbations des PPRI étudiés

²⁴ DDE des Bouches-du-Rhône, 1999. Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles. Commune d’Auriol. Rapport de présentation. 12 p.

2.3.3.2 Les sources des documents

Tel que mentionné précédemment, nous disposons de trois sources pour établir la base de données de PPRI : les sites des DDT, le site Cartorisque, et une recherche directement sur moteur de recherche internet.

Les DDT ont la charge d'établir et de diffuser les PPRI. Cette source d'information, qui constitue 57 % des documents récoltés, présente l'intérêt de proposer une interface claire en classant les documents par cours d'eau et en distinguant les types de documents (rapport, règlement, carte d'aléa...). La rubrique du site internet de la DDT consacrée aux PPRI est souvent l'occasion pour les services de l'Etat d'apporter des informations complémentaires sur les documents consultés, mais aussi d'informer sur les PPRI en cours d'élaboration. De tous les sites de DDT consultés, c'est certainement celui de la DDTM du Gard qui présente la « rubrique PPRI » la plus fournie, explicable sans doute par la part prépondérante que prennent les inondations dans le département²⁵.

Le site Cartorisque, bien connu pour diffuser des données géographiques sur les risques contient en outre une base de données de documents tels que des PPRI ou des AZI. L'adresse suivante²⁶, donne accès à une liste de dossiers représentant les départements français dans lesquels se trouvent les documents. Cette plateforme s'avère utile pour les DDT qui ne possèdent pas de « rubrique PPRI » et constitue 36 % des PPRI étudiés. Contrairement aux sites des DDT qui présentent le contexte de réalisation du PPRI, le site Cartorisque ne donne accès qu'à une liste de documents. Pour les documents accessibles sur un site de DDT et sur le site Cartorisque, nous le classons comme disponible sur le site de la DDT. Enfin, 7 % des PPRI récoltés sont issus d'une investigation sur moteur de recherche internet.

L'évolution temporelle des types de source (Figure 28 et Figure 29) nous permet surtout de mettre en avant que les PPRI les plus récents sont diffusés par un site internet de DDT. En revanche il est important de noter que la fin de l'approvisionnement de la base Cartorisque dès 2009 constitue un biais dans la constitution de notre base de données dont il faut tenir compte.

²⁵ <http://www.gard.equipement.gouv.fr/ppri-r66.html>

²⁶ <http://cartorisque.prim.net/dpt/>

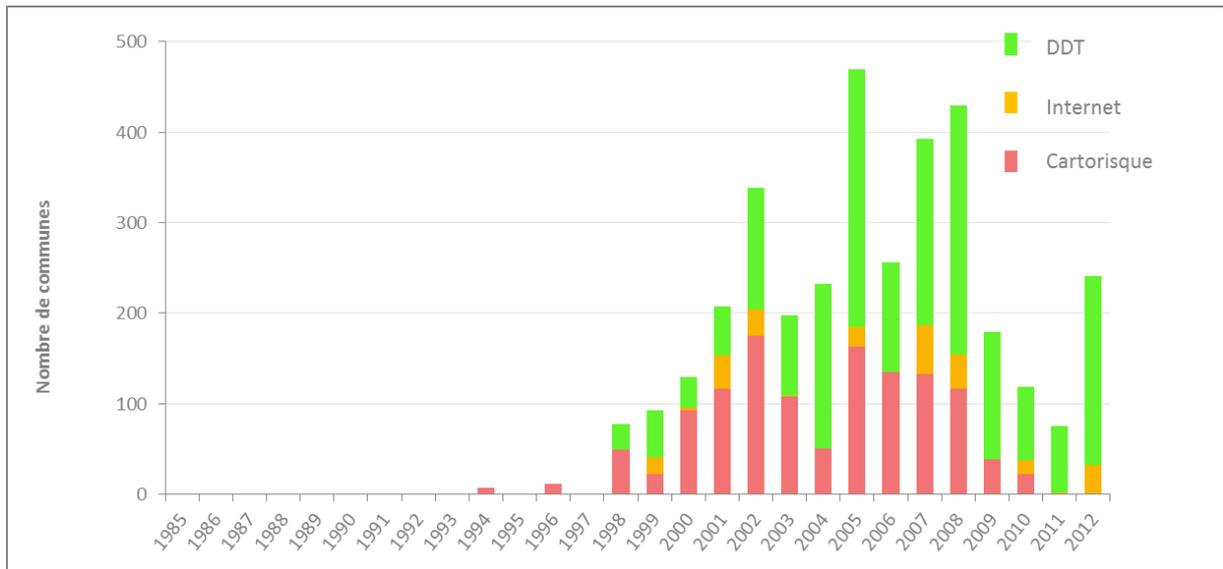


Figure 28 : Distribution des communes des PPRI étudiés selon l'année d'approbation et selon la source d'information

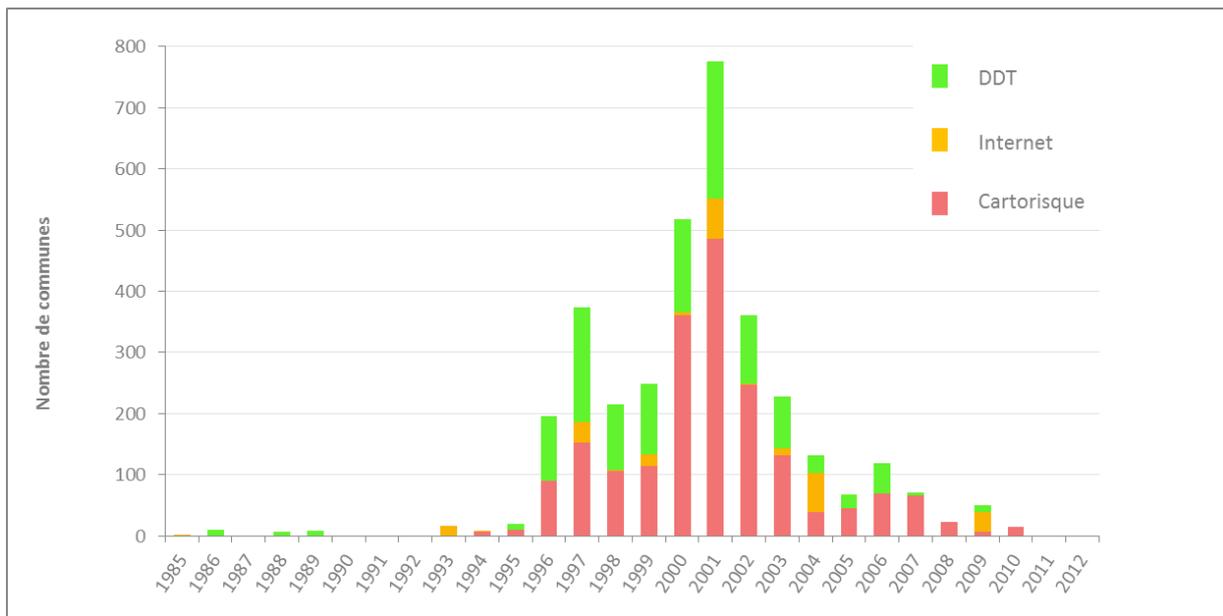


Figure 29 : Distribution des communes des PPRI étudiés selon l'année de prescription et selon la source d'information

En termes de répartition spatiale (Figure 30) plusieurs tendances se dégagent. La première est un axe de la vallée du Rhône jusqu'au département des Pyrénées-Atlantiques. Les DDT y diffusent elles-mêmes leur PPRI, tout comme les départements du Bassin Parisien, les deux régions normandes, la Picardie et le Nord-Pas-de-Calais. En revanche la diffusion par le site Cartorisque domine en Poitou-Charentes et en Alsace.

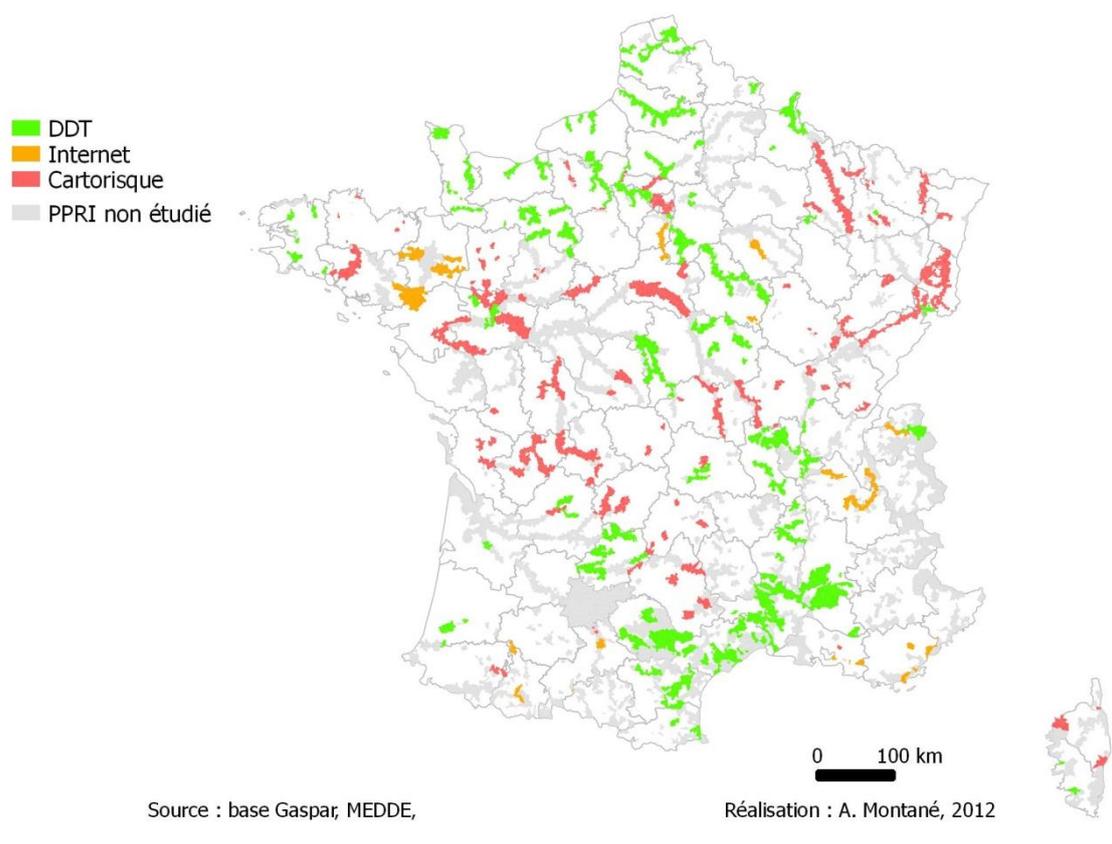


Figure 30 : Distribution spatiale des sources des rapports de présentation des PPRI étudiés

2.3.3.3 Crue de référence

La crue de référence d'un PPRI est définie dès 1994 par la circulaire relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables. Elle correspond à « la plus forte crue connue et, dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue de fréquence centennale, à prendre en compte cette dernière ». La présentation des données hydrologiques au sein du rapport méthodologique est l'occasion de comparer la crue historique considérée comme la plus importante à un débit centennial modélisé. Si la crue historique est supérieure à la crue centennale, c'est donc la crue historique qui vaut crue de référence. Cependant dans de nombreux PPRI, les auteurs du rapport observent que la crue historique est équivalente à une crue centennale. Dans ce cas, nous classons le document comme utilisant une crue historique et seuls les PPRI reposant sur une crue centennale statistique sont classés comme « Q100 ».

L'utilisation des crues historiques se concentre dans le bassin hydrographique de la Seine, de la Loire, dans le Sud-Ouest, ainsi que sur l'arc Méditerranéen (Figure 31). Certaines DDT prennent uniquement en compte la cartographie hydrogéomorphologique comme aléa de référence, en justifiant ce choix par l'absence de données hydrologiques fiables et par la faiblesse des enjeux concernés. C'est notamment le cas du PPRI du canton de Conty²⁷ réalisé par la DDTM de la Somme.

²⁷ DDTM de la Somme, 2008. Plan de Prévention des Risques Inondation du canton de Conty. Note de Présentation. 41 p.

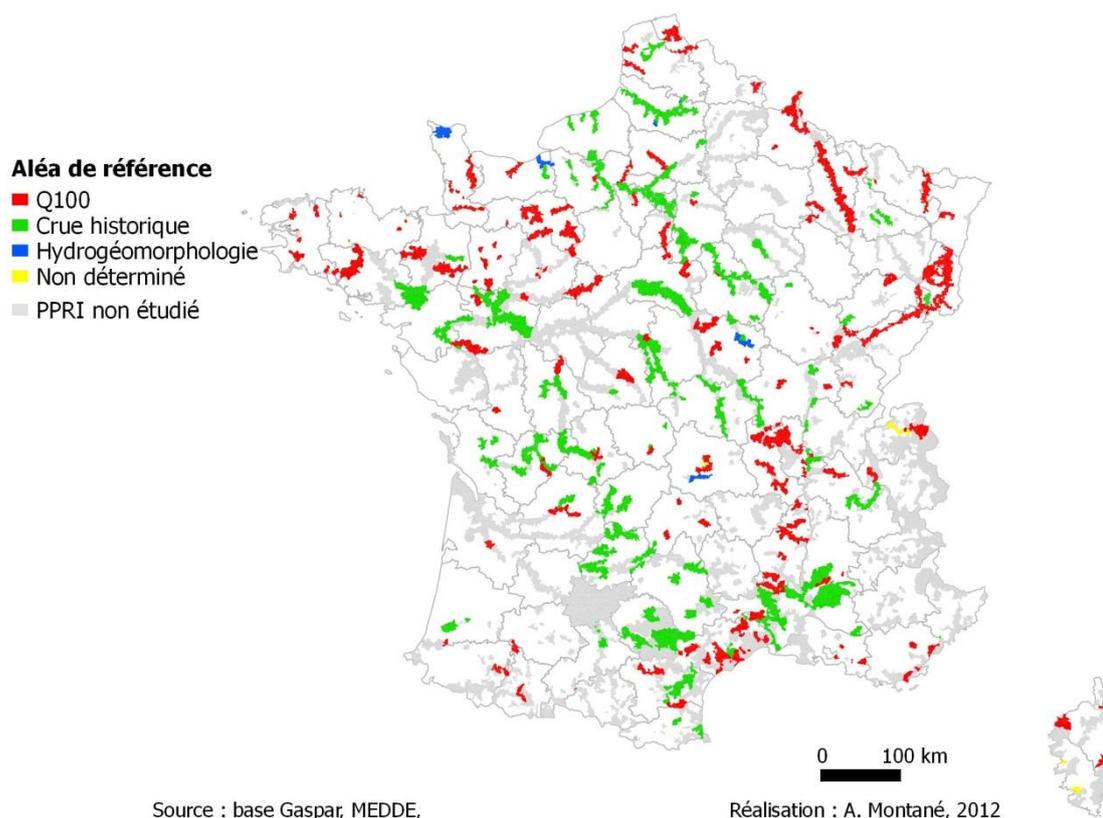


Figure 31 : Distribution spatiale du type de crue de référence des PPRI étudiés

2.3.3.4 Les crues historiques de référence des PPRI

La Figure 32 présente la répartition spatiale des périodes où sont survenues les crues historiques de référence des PPRI étudiés. La série de crues historiques est découpée en quatre périodes, visibles sur la Figure 33.

Parmi les crues historiques datant du XIX^{ème} siècle, on constate la présence des crues qui se sont déroulés sur les grands fleuves et cours d'eau français. Citons par exemple les crues de la Saône en 1840, le Rhône en 1856, la Loire en 1866 ou encore la Garonne en 1875. Par ailleurs, la DDT de la Haute-Garonne associe les événements de 1875 à Toulouse comme une « crue hydrogéomorphologique » en raison de son emprise « largement supérieure à une crue centennale » et qui a rempli « entièrement le lit majeur²⁸ ».

Les crues de la première moitié du XX^{ème} siècle sont marquées par l'omniprésence de l'évènement de 1910 qui est la crue de référence pour tout le bassin de la Seine. Les crues de 1927 et 1930 dans le Sud-Ouest, de 1940 sur le Cher et de 1947 sur la majorité des cours d'eau Lorrains, font également partie des inondations marquantes de la première moitié du siècle dernier.

La période 1951-1980, marquée par un « repos hydrologique » (Vinet, 2010) fut tout de même le théâtre de plusieurs événements localement marquants qui servent de crue de référence à des PPRI.

²⁸ DDT de la Haute-Garonne, 2011. Plan de prévention du risque d'inondation de la ville de Toulouse. Notice de présentation. 93 p.

Citons notamment les crues de la Dordogne de 1952, du Limousin de 1960 ou encore le Sud de la Bretagne en 1974. Ces crues locales touchèrent des petits bassins versants à faibles enjeux. Elles n'eurent pas le même retentissement médiatique que les crues du XIX^{ème} et du début du XX^{ème} siècle qui touchèrent des grandes villes telles que Paris, Lyon ou Toulouse.

Enfin, les crues historiques de référence les plus récentes sont regroupées dans le Sud de la France avec l'Ouvèze en 1992, l'Aude en 1999 ou encore le Gardon en 2002, mais aussi sur la façade Atlantique avec la Vilaine en 1995 ou encore la Somme en 2001.

Tous ces événements se retrouvent dans le recensement des inondations historiques menées dans le cadre de l'EPRI (Evaluation Préliminaire des Risques d'Inondation), première phase de la « Directive Inondation » (Lang *et al.*, 2013).

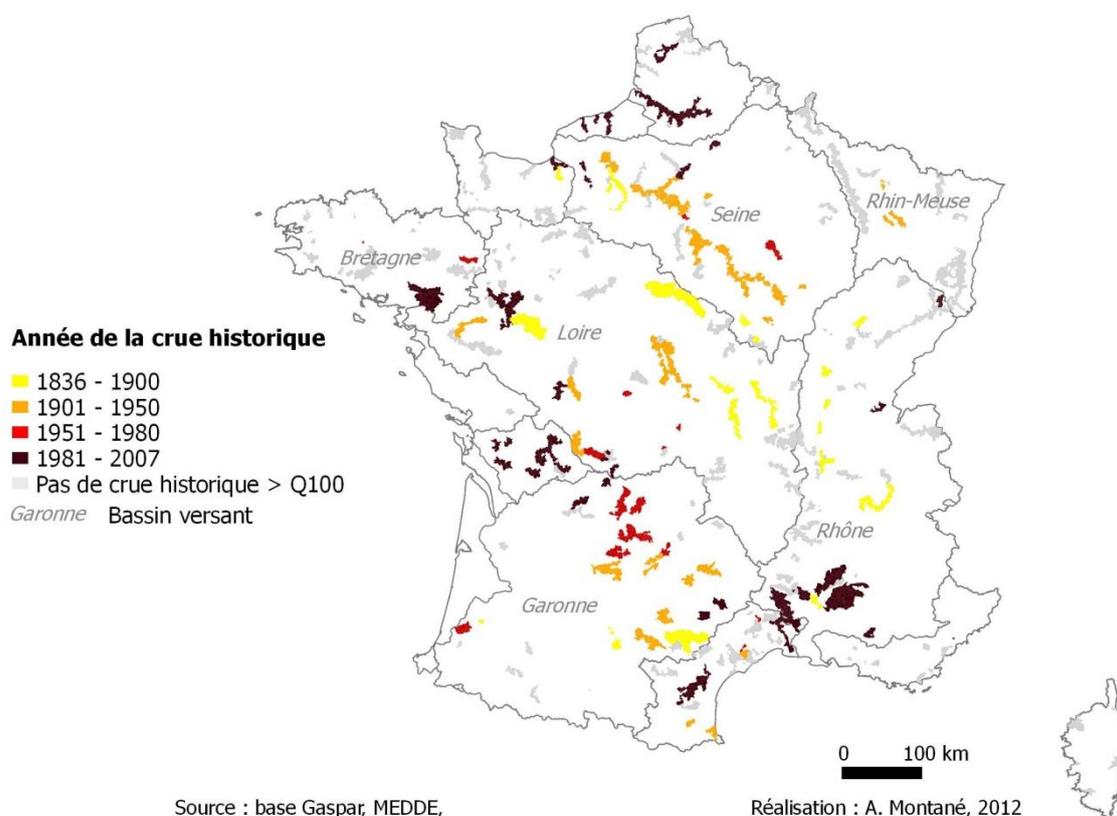


Figure 32 : Les crues historiques des PPRI étudiés

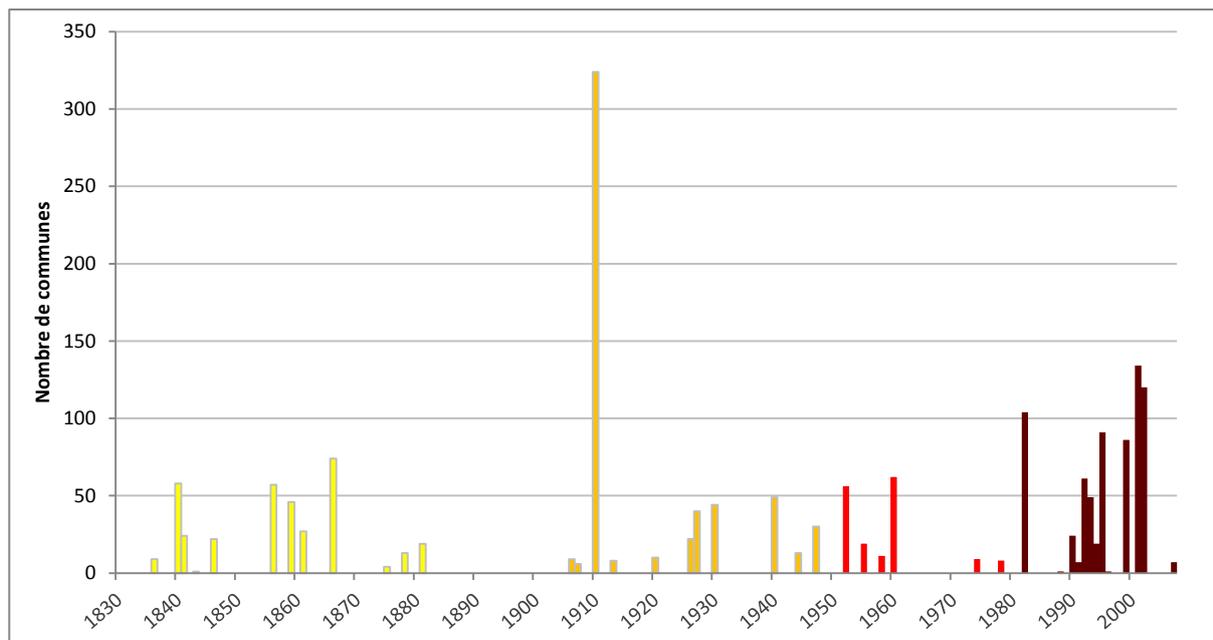


Figure 33 : Chronologie des crues historiques de référence des PPRI étudiés

2.3.3.5 Utilisations de la cartographie hydrogéomorphologique pour le diagnostic de l'aléa

Lors notre l'analyse des PPRI, le critère principal retenu est le degré d'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique. Avant notre lecture des PPRI, la typologie n'était pas clairement définie. Celle-ci s'est forgée au fur et à mesure. La recherche s'effectue au sein du rapport de présentation en portant attention aux termes « hydrogéomorphologie » ou « géomorphologie », mais aussi en analysant les cartographies d'aléa si disponibles. Au final, nous distinguons cinq cas de figure qui ont été gradués en fonction de l'investissement de l'hydrogéomorphologie dans le PPRI :

- non utilisé,
- cité,
- zones sans enjeux,
- aléa résiduel,
- aléa de référence.

La typologie établie souffre de plusieurs limites. Tout d'abord, la prise en compte de l'hydrogéomorphologie est recommandée par le ministère en charge de la gestion des risques, mais les modalités de cette prise en compte ne sont pas précisées dans un guide méthodologique en vue d'une homogénéisation des pratiques. Ensuite, lorsque l'hydrogéomorphologie est effectivement prise en compte pour règlementer l'urbanisme, nous trouvons souvent peu de détails dans le rapport méthodologique. Cette absence de méthodologie détaillée est peut-être le reflet d'un manque d'appropriation de l'hydrogéomorphologie comme méthode de diagnostic de l'aléa.

Les PPRI qui n'utilisent pas du tout de cartographie hydrogéomorphologique concernent 64 % des documents étudiés. Cette classe signifie que la méthode n'est pas du tout mentionnée et n'apparaît pas

sur les cartographies d'aléa. Ce type de PPRI se retrouve essentiellement dans les deux tiers Nord de la France (Figure 34).

Dans certains PPRI, la note de présentation fait mention de la cartographie hydrogéomorphologique comme d'une méthode utilisée pour caractériser l'aléa, sans préciser de quelle manière la méthode est prise en compte. C'est le cas par exemple du PPRI de « la Meuse aval²⁹ » qui cite la méthode, mais qui au final ne montre nullement comment et surtout si celle-ci est réellement utilisée.

19 % des PPRI étudiés (Figure 34) prennent en compte la cartographie hydrogéomorphologique pour représenter l'aléa dans les zones sans enjeux et sur les affluents qui ne font pas l'objet d'une modélisation hydraulique. Le PPRI de la Figarella³⁰ illustre bien cette pratique. Le rapport mentionne la réalisation d'une modélisation hydraulique dans les parties urbaines et d'une cartographie hydrogéomorphologique pour les secteurs sans enjeux.

Le terme d'« aléa résiduel » fait référence à une pratique de cartographie de l'aléa rencontrée dans 7 % des PPRI étudiés. Contrairement à la pratique précédente où l'hydrogéomorphologie est cantonnée aux zones ne disposant pas de modélisation hydraulique, l'hydrogéomorphologie est prise en compte pour la cartographie de l'aléa sur tout le linéaire d'étude. Le terme d'« aléa résiduel » renvoie à la portion d'espace comprise entre la marge de la crue de référence et la limite externe du lit majeur. Cette pratique se rencontre essentiellement dans la région Languedoc-Roussillon, ainsi que dans les départements du Vaucluse et récemment du Var avec le PPRI de l'Argens³¹ qui fait suite aux inondations de juin 2010.

Enfin, une proportion faible de PPRI n'utilise pas de modélisation hydraulique pour caractériser l'aléa inondation. Ces PPRI ont la particularité de ne pas disposer de données historiques suffisantes pour une modélisation hydraulique. C'est par exemple le cas du PPRI de l'Yonne dans le secteur de Corbigny³².

²⁹ DDE des Ardennes, 2010. PPRI de la Meuse aval. Note de présentation. 25 p.

³⁰ DDE de Haute-Corse, 2008. Plan de Prévention du Risque Inondation du bassin de la Figarella. Rapport de présentation. 51 p.

³¹ DDTM du Var, 2012. Plan de Prévention des Risques Naturels d'Inondation. Commune de Vidauban. Cartographie des aléas.

³² DDE de la Nièvre, 2008. Plan de Prévention du Risque Inondation de l'Yonne. Secteur de Corbigny. Note de présentation. 31 p.

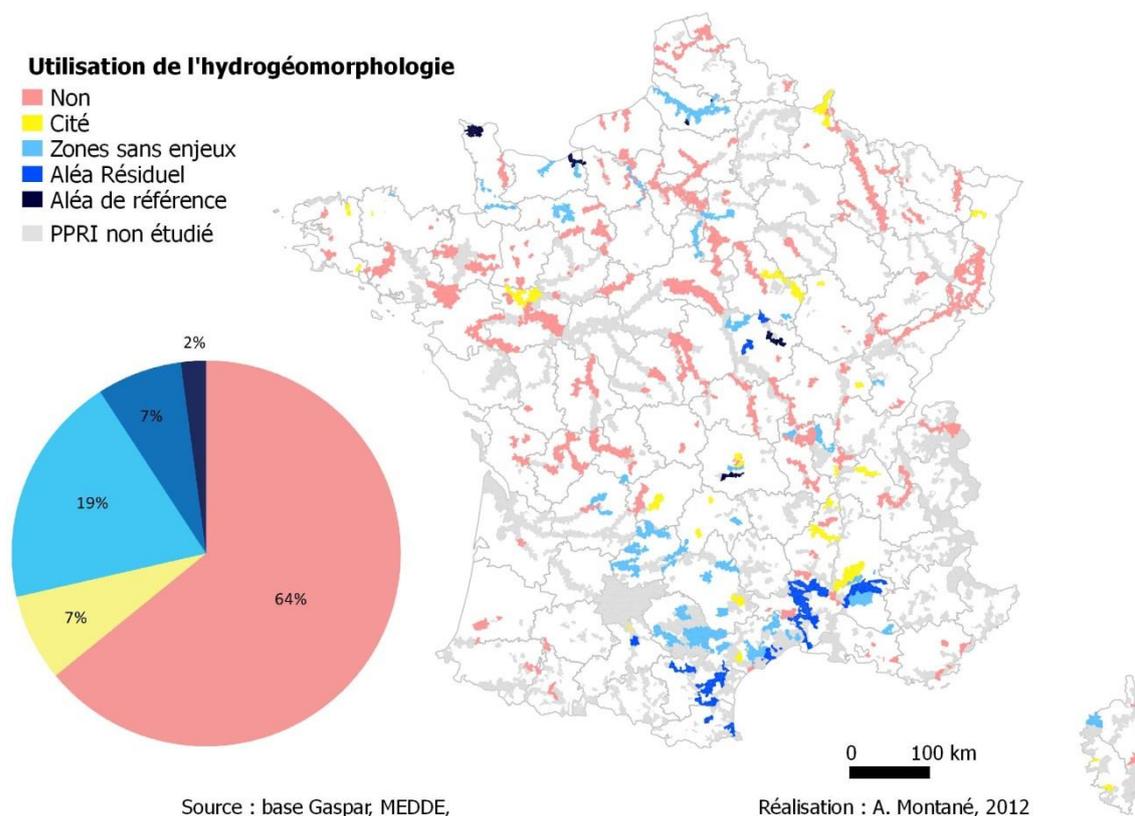


Figure 34 : Cartographie de la prise en compte de l'hydrogéomorphologie dans les PPRI analysés

Jusqu'à la fin des années 1990, la part des PPRI prescrits utilisant une cartographie hydrogéomorphologique reste largement minoritaire. A partir de 2000, près de la moitié des PPRI prescrits, présentent une citation de l'hydrogéomorphologie (Figure 35a). En termes de PPRI approuvés (Figure 35b) le diagramme montre que l'hydrogéomorphologie prend une place relative au fil du temps. La place plus importante de la cartographie hydrogéomorphologique en termes de d'approbation est à relativiser. En effet, tel que mentionné précédemment, le site Cartorisque n'est plus mis à jour depuis le courant de l'année 2009. Or les DDT qui ne diffusent pas elles-mêmes leur PPRI ont également une faible propension à l'emploi de cartographie hydrogéomorphologique dans leur PPRI.

Toutefois, il apparait clairement que la cartographie hydrogéomorphologique prend une place relative et absolue plus élevée dans les méthodologies de diagnostic de l'aléa (Figure 35a). En 2000 et 2001, moins de 10 % des PPRI approuvés mentionnaient ou utilisaient l'hydrogéomorphologie. En 2008, plus de la moitié des PPRI approuvés tiennent compte de la cartographie hydrogéomorphologique ou du moins citent la méthode dans le rapport de présentation. De 2009 à 2012, on observe une percée de l'utilisation de l'aléa résiduel, essentiellement dans des communes de l'arc méditerranéen (Figure 34).

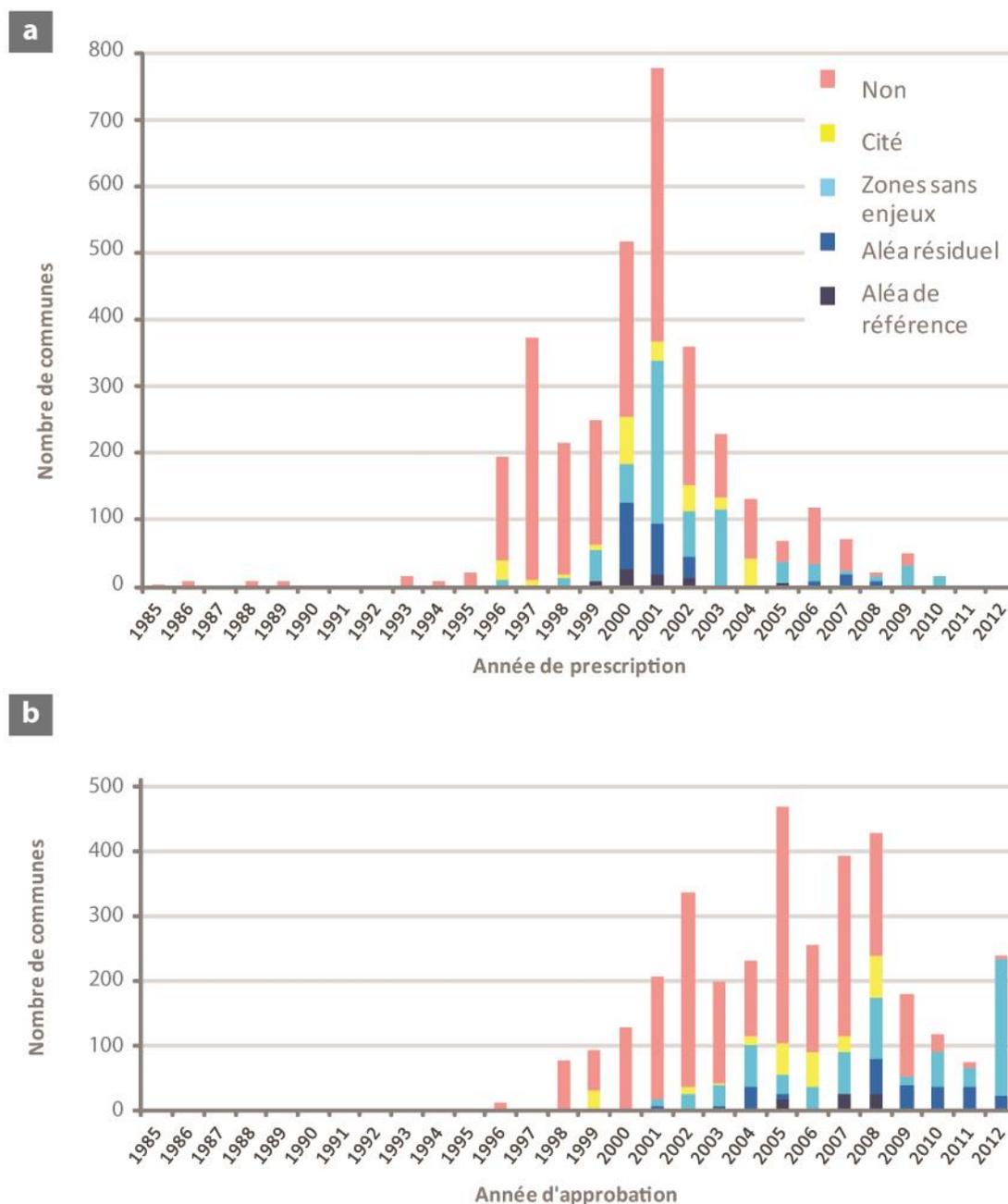


Figure 35 : L'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI étudiés, par année de prescription de prescription

2.3.4 Usages règlementaires de la cartographie hydrogéomorphologique

Comme le précisent 65 % des représentants des DREAL et des DDT interrogés (p. 49), la principale limite de la cartographie hydrogéomorphologique demeure l'absence de cote de crue qui complique toute tentative d'utilisation règlementaire. Pourtant, plusieurs DDT s'affranchissent de cette limite pour faire de la cartographie hydrogéomorphologique une composante incontournable de la

cartographie de l'aléa et de la réglementation de l'urbanisme en zone inondable. Nous détaillons ci-après les différentes utilisations de la cartographie hydrogéomorphologique pour des PPRI et leurs implications réglementaires.

2.3.4.1 Hydrogéomorphologie pour les affluents et les zones sans enjeux

Cette pratique, mentionnée dans le point précédent, se retrouve en France de manière homogène (Figure 34). Elle répond au besoin de concentrer les ressources financières de l'Etat pour la caractérisation de l'aléa dans les zones à enjeux. L'hydrogéomorphologie y est utilisée uniquement pour l'extension des zones inondables hors des zones urbaines. Le passage de la cartographie de l'aléa au zonage réglementaire est présenté dans la Figure 36. L'hydrogéomorphologie, souvent nommée dans ce contexte « zone naturelle » ou « zone d'expansion de crue », est associée à un ou plusieurs zonages réglementaires caractérisés par des interdictions de construire. Dans les zones sans enjeux, un aléa inondation indifférencié reste suffisant. Dans ces cas de figure, la cartographie hydrogéomorphologique est particulièrement adaptée.

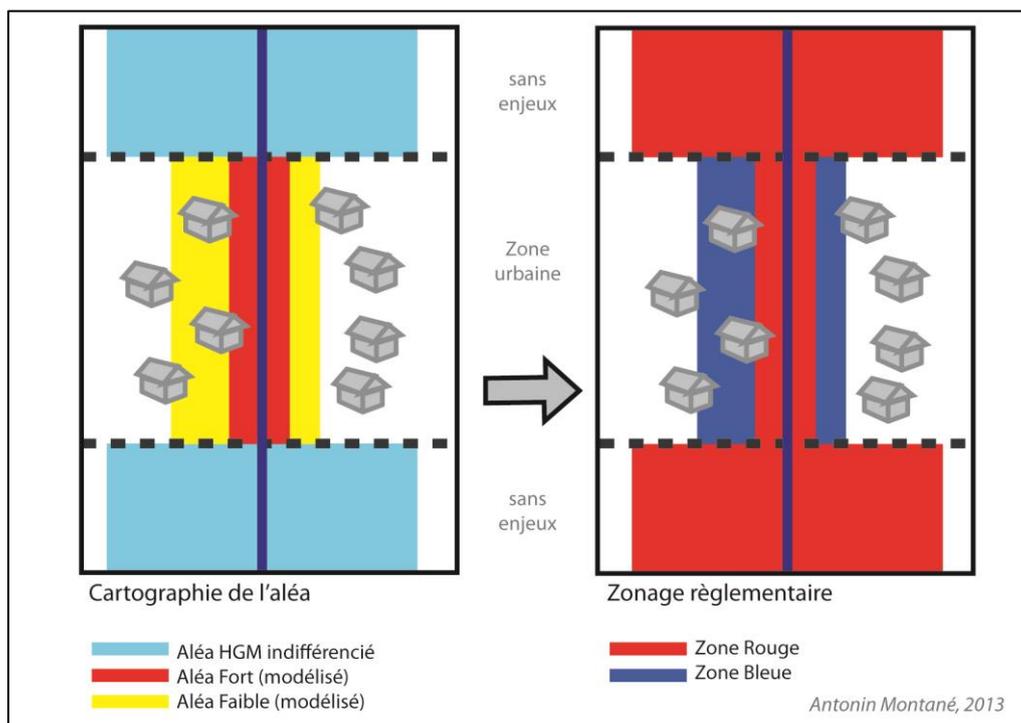


Figure 36 : Utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique pour les zones sans enjeux et les affluents

Certains PPRI utilisent la cartographie hydrogéomorphologique uniquement dans les zones sans enjeux. Ceux-ci présentent une méthode permettant de qualifier l'aléa inondation sans modélisation. C'est le cas notamment des PPRI du Manoire et de la Beauronne, des affluents de la Dordogne³³. Cette

³³ DDT de Dordogne, 2012. Plan de Prévention du Risque Inondation. Rivière la Beauronne et l'Alemps. Commune d'Agonac. Rapport de Présentation. 39 p.

méthodologie vise à identifier des correspondances entre les formes observées sur le terrain et des classes d'aléa (Figure 37). Le point primordial de cette méthode revient à spatialiser la zone d'écoulement dynamique (ZED) qui concentre l'aléa fort, mais également les remblais qui peuvent déclasser le niveau d'aléa. La zone d'écoulement dynamique regroupe les lits mineurs et moyens, ainsi que tous les espaces du lit majeur concernés par des vitesses d'écoulement ou des hauteurs d'eau élevées. C'est le cas des axes d'écoulement ou des dépressions en lit majeur.

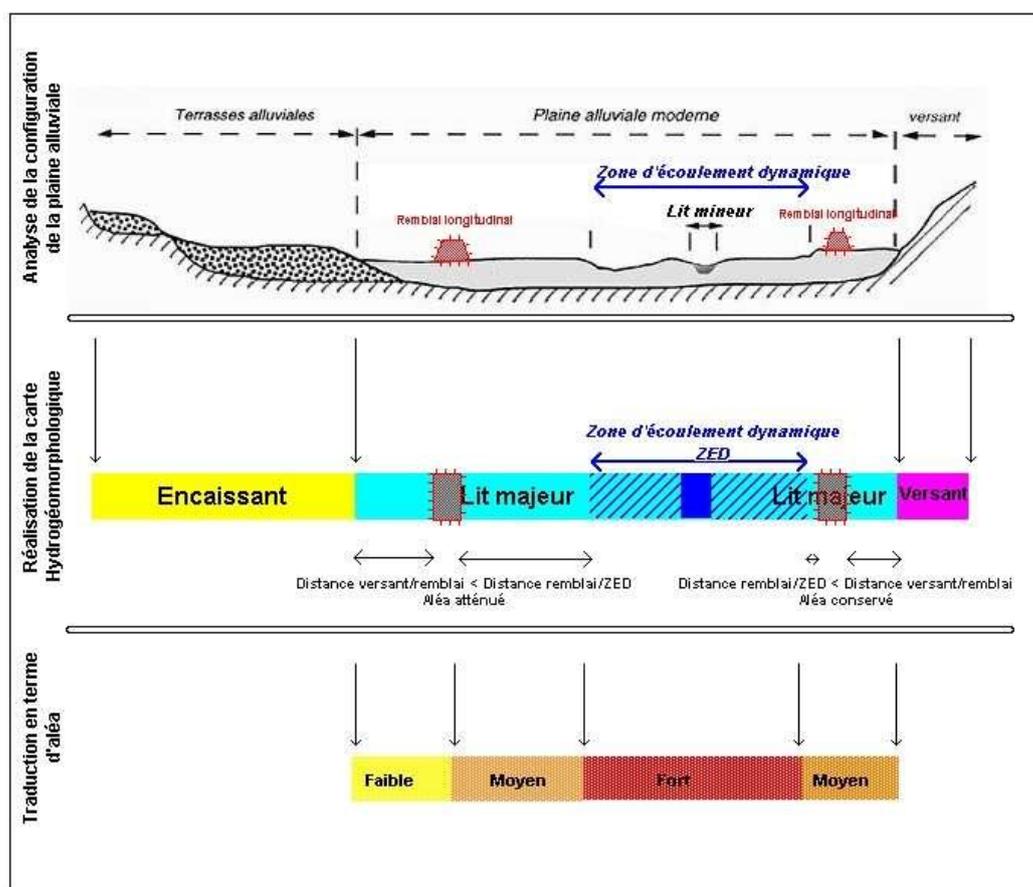


Figure 37 : Réalisation d'une carte d'aléa à partir d'une cartographie hydrogéomorphologique (Source : O. Vento, 2008)

La cartographie de l'aléa inondation réalisée dans le cadre du PPRI du Manoire (Figure 38), montre comment peuvent être articulées des zones d'aléa modélisées, situées entre les profils et les zones utilisant « l'aléa hydrogéomorphologique » en aval.

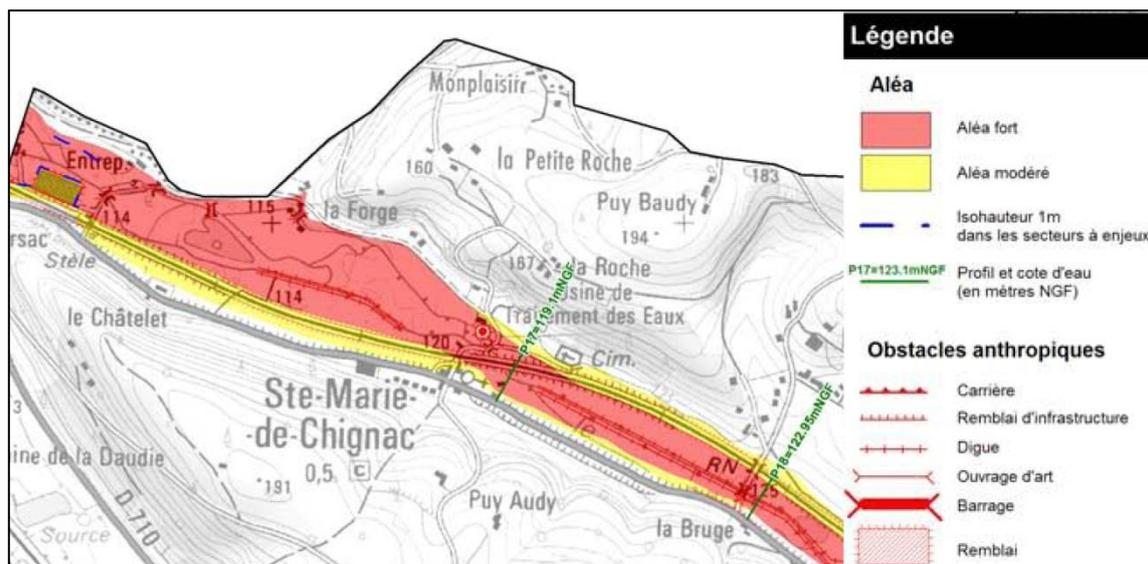


Figure 38 : Extrait de la cartographie de l'aléa inondation du Manoire. (Source : DDT de la Dordogne, 2012)

Des nuances d'intensité peuvent exister pour la cartographie de l'aléa. Or, la valeur réglementaire des zones sans enjeux est homogène et ne diffère pas de la réglementation des « zones rouges » d'autres PPRI. En matière d'interdiction, ce sont les constructions de nouveaux bâtiments (logements, transformateurs électrique, stations d'épuration...) qui sont concernées. En revanche, les prescriptions autorisent l'aménagement de bâtiments existants sous réserve qu'ils n'augmentent pas la vulnérabilité des personnes et des biens. Ces « zones rouges » caractérisées par des interdictions, ne nécessitent pas de faire référence à une cote de crue, c'est là leur intérêt. L'utilisation de l'hydrogéomorphologie dans ce contexte facilite son utilisation réglementaire.

2.3.4.2 Le cas particulier des PPRI de la région Midi-Pyrénées

Mise à part le PPRI de Toulouse qui utilise un aléa résiduel et les PPRI des Hautes-Pyrénées qui n'emploient pas l'hydrogéomorphologie, tous les PPRI de la région Midi-Pyrénées sont classés comme employant la cartographie hydrogéomorphologique sur les affluents et les zones sans enjeux. La réalité mérite d'être nuancée. En effet la CIZI (Lambert *et al.*, 2000) sur laquelle repose des PPRI de la région est composée d'une combinaison d'informations historiques dans les sections urbaines et d'hydrogéomorphologie dans les secteurs moins fournis en repères de crues. Dans les sections urbaines, il n'y a pas de distinction entre une crue de référence et la limite du lit majeur. L'hydrogéomorphologie sert uniquement à qualifier l'aléa (aléa faible, moyen, fort) et ne correspond pas à une enveloppe de zone inondable réutilisée dans le zonage du PPRI. En conséquence, nous ne pouvons pas classer ce type d'utilisation de l'hydrogéomorphologie en tant qu'aléa résiduel.

2.3.4.3 Valeur règlementaire de l'aléa résiduel

Si le terme d'aléa résiduel n'est utilisé que dans le Gard³⁴, il reflète une pratique visible dans d'autres départements. Ce type d'aléa concerne « les secteurs qui ne sont pas directement exposés aux risques d'inondation au regard de la crue de référence, mais susceptibles d'être mobilisés pour une crue supérieure à la crue de référence ». La crue supérieure à la crue de référence est ici déterminée par la cartographie hydrogéomorphologique.

L'aléa résiduel apporte deux particularités pour les affluents et zones sans enjeux. Tout d'abord, la cartographie hydrogéomorphologique n'est plus cantonnée aux zones sans enjeux, mais est également prise en compte dans des zones urbanisées. Ensuite, la cartographie hydrogéomorphologique fait l'objet d'une véritable appropriation et correspond à un zonage règlementaire particulier. La Figure 39 illustre l'intérêt de la prise en compte de l'hydrogéomorphologie dans les zones urbaines puisque la totalité de la zone inondable est concernée par le règlement du PPRI.

³⁴ DDE du Gard, 2008a. Plan de Prévention des Risques d'Inondation du Gardon Amont. Rapport de présentation.

DDE du Gard, 2008b. Plan de Prévention des Risques d'Inondation sur le Moyen Vidourle. Rapport de présentation. 54p.

DDTM du Gard, 2010. Plan de Prévention des Risques d'Inondation du Gardon d'Alès. Rapport de présentation.

DDTM du Gard, 2011. Plan de Prévention des Risques Inondation de la Cèze. Rapport de Présentation.

DDTM du Gard, 2012a. Plan de Prévention des Risques Inondation. Basse plaine Camargue Gardoise. Commune de Saint-Laurent-d'Aigouze. Rapport de présentation. 59 p.

DDTM du Gard, 2012b. Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI). Commune de Nîmes. Rapport de présentation du PPRI. 35 p.

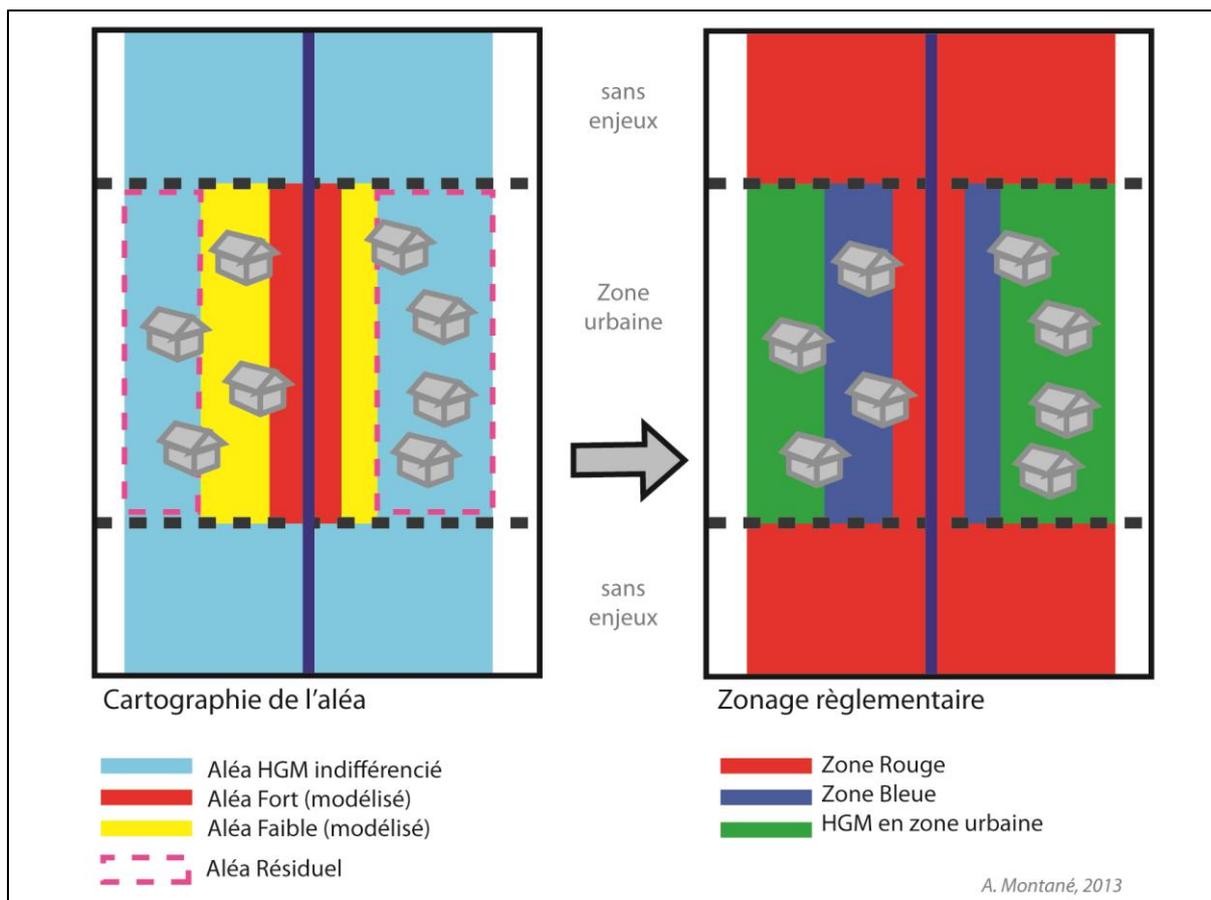


Figure 39 : Vision schématique de l'utilisation de l'aléa résiduel dans les zones urbaines

Dans certains départements, l'emploi de l'hydrogéomorphologie dans les zones urbaines est tout à fait assumé (départements de Languedoc-Roussillon et le Vaucluse). En revanche, dans d'autres départements (Haute-Garonne, Nièvre), il est souvent nécessaire de « lire entre les lignes » du règlement.

La combinaison entre un aléa d'inondation faible et une zone urbaine aboutit à un zonage réglementaire caractérisé par des normes de prescription. L'hydrogéomorphologie ne déroge pas à la règle et doit donc être associée à des normes d'urbanisme et en particulier à un calage des premiers niveaux de plancher par rapport à une cote de référence. Or, une cartographie hydrogéomorphologique ne permet pas de produire de cotes de référence. Afin de pallier cette lacune, la solution mise en pratique par les DDT concernées (Figure 40) consiste à appliquer une cote de référence équivalente en zone d'aléa résiduel à plusieurs dizaines de centimètres par rapport à la cote du terrain naturel (TN).

d'inondation pris en compte. Le PPRI de la basse plaine du Vidourle³⁶ se distingue par exemple par des crues lentes et n'est concernée que par une cote TN+50 cm, alors que la zone « R-U » du PPRI des Gardons amont présente une cote de TN+80 cm.

Dans l'Hérault, l'hydrogéomorphologie en zone urbaine est nommée « ZP1 » (zone de précaution 1). Elle est associée à une cote de référence de TN+30 cm pour le PPRI des cours d'eau de l'étang de Thau³⁷, le seul PPRI de ce type collecté pour le département.

Le rapport du PPRI demeure l'occasion pour les services de l'Etat de faire part de la logique employée pour définir le zonage réglementaire. La comparaison entre le schéma de la DDTM du Gard et celui de la DDTM de l'Hérault montre que les deux services doivent échanger sur leurs pratiques tant la ressemblance est troublante (Figure 42). Néanmoins, sans prendre en compte l'aspect des schémas, ce sont bien les différences d'appellation des différentes zones qui sont marquantes et qui sont un frein supplémentaire à une bonne compréhension interdépartementale des PPRI.

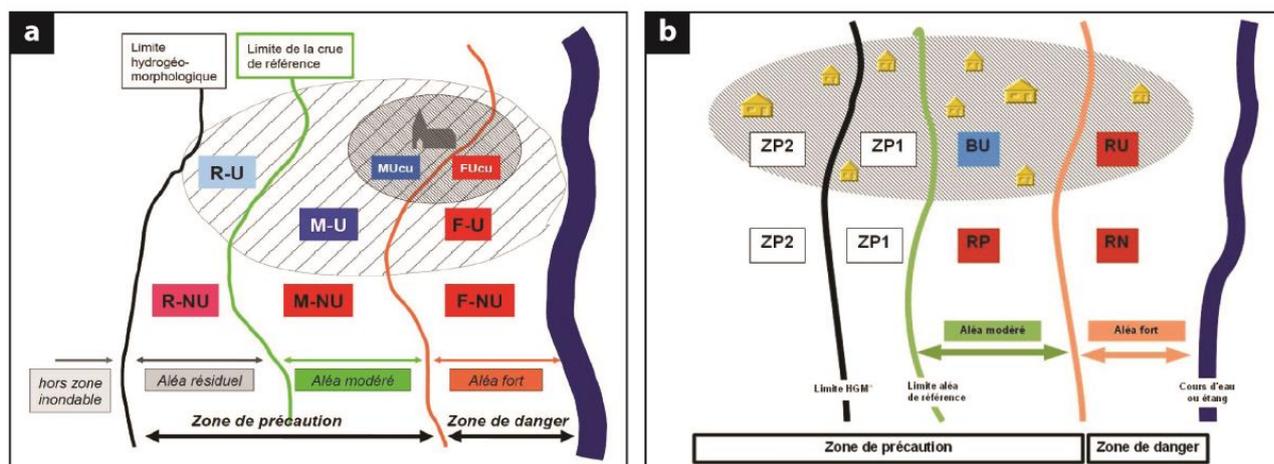


Figure 42 : Le zonage réglementaire dans les départements du Gard (a) et de l'Hérault (b). (Source : DDTM du Gard et DDTM de l'Hérault)

Le département de l'Aude présente cinq PPRI (Trapel, Orbieu, Verdoube, Fresquel, Cesse) où l'hydrogéomorphologie est présente dans le zonage réglementaire. L'homogénéité des appellations de zonage et des règlements y est remarquable. La cartographie hydrogéomorphologique en zone urbaine est appelée « zone RI4 » et est associée à une cote de TN+60 cm.

Plus au sud, le département des Pyrénées-Orientales classe l'hydrogéomorphologie en zone urbaine sous le code « B1 » (Bleu 1) qui coïncide avec une cote de TN+50 cm. Cela est valable pour les PPRI du Tech aval³⁸ et du PPRI du Boulès³⁹.

³⁶ DDTM du Gard, 2012a. Plan de Prévention des Risques Inondation. Basse plaine Camargue Gardoise. Commune de Saint-Laurent-d'Aigouze. Rapport de présentation. 59 p.

³⁷ DDTM de l'Hérault, 2012. Plan de prévention des risques naturels d'inondation. Bassin versant de l'étang de Thau. Commune de Gigean. Rapport de présentation. 53 p.

A l'extérieur de la région Languedoc-Roussillon, seul le département du Vaucluse semble accepter pleinement l'hydrogéomorphologie en zone urbaine. L'aléa résiduel cartographié pour le PPRI de l'Ouvèze⁴⁰, se retrouve dans le règlement sous l'appellation « zone verte » qui équivaut à une cote de premier plancher à TN+70 cm (Figure 43). Le PPRI de l'Ouvèze s'étend également dans le département de la Drôme dans sa partie amont, dans le massif des Baronnies. Nous n'incluons pas la Drôme dans les départements qui emploient l'hydrogéomorphologie en zone urbaine, car le PPRI de l'Ouvèze est sous maîtrise d'œuvre de la DDT du Vaucluse.

En outre, l'hydrogéomorphologie est adoptée dans les portions urbaines du PPRI de Toulouse⁴¹. La zone se nomme « HGI » (Zone Hachurée Gris Inondation), associé à une cote de premier plancher de TN+30 cm.

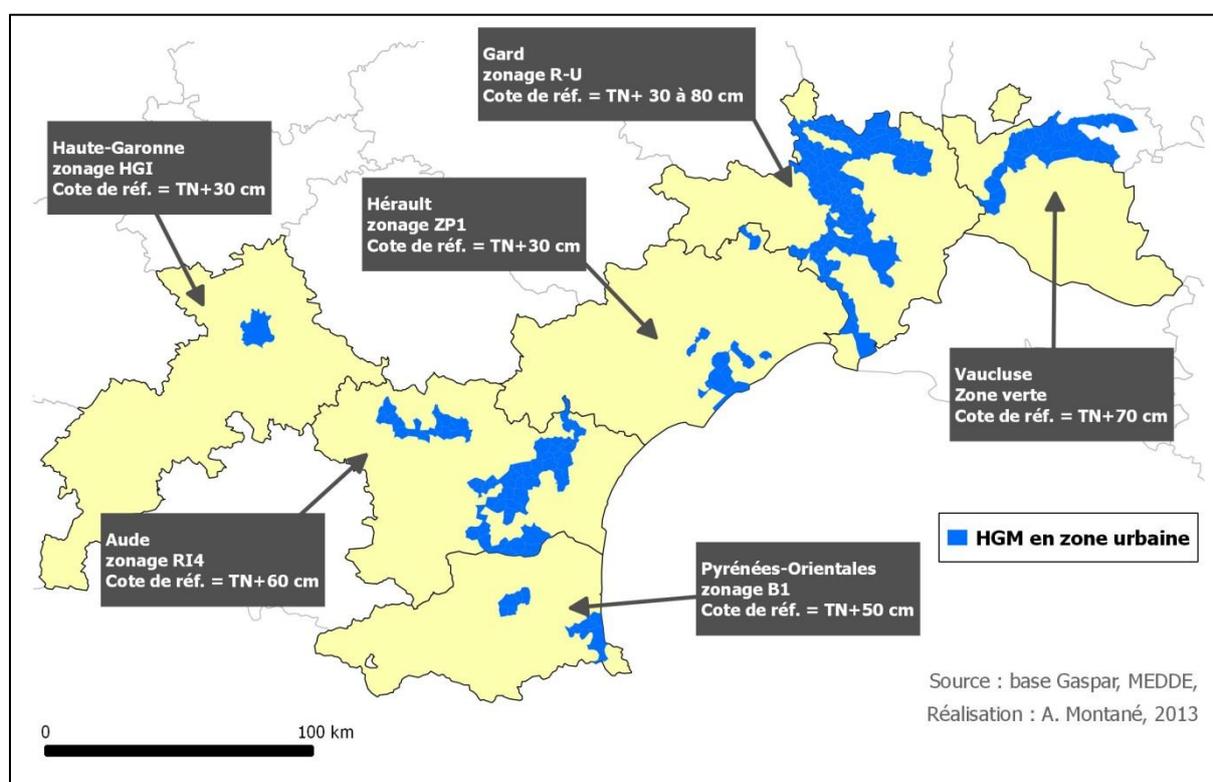


Figure 43 : La « cote HGM » dans les zones urbaines des PPRI

En plus de surcote, l'hydrogéomorphologie en zone urbaine est assortie d'interdictions qui concernent les types d'usage des sols. Par exemple, peuvent être interdits les établissements recevant des

³⁸ DDTM des Pyrénées-Orientales, 2012. Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles. Risque Inondation. Tech aval. Commune de Palau-del-Vidre. 35 p.

³⁹ DDTM des Pyrénées-Orientales, 2012b. Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles. Risque Inondation. Bassin versant du Boulès. Commune de Bouleternère. 54 p.

⁴⁰ DDT du Vaucluse, 2009. Plan de Prévention des Risques naturels d'inondation du bassin versant de l'Ouvèze et de ses affluents en Vaucluse. Rapport de présentation. 49 p.

⁴¹ DDT de la Haute-Garonne, 2011. Plan de prévention du risque d'inondation de la ville de Toulouse. Notice de présentation. 93 p.

personnes vulnérables (maisons de retraites, écoles...), les bâtiments participant à la gestion de crise (mairie, caserne de pompiers...), les transformateurs électriques, les stations d'épuration.

2.3.4.4 L'hydrogéomorphologie en tant qu'aléa de référence

Sans que cela fasse réellement partie d'une pratique bien définie, certains PPRI ne présentent aucune modélisation hydraulique réalisée. Compte-tenu de l'absence de données fiables sur les crues historiques, le PPRI repose uniquement sur une cartographie hydrogéomorphologique. C'est par exemple le cas de deux PPRI réalisés dans la Somme, ainsi que d'un PPRI situé dans le département de la Nièvre.

Les PPRI du Canton de Conty et de Mesnil-Martinsart, réalisés par la DDTM de la Somme, sont approuvés en 2008. Bien que non contigus ces PPRI réalisés à la même période suivent une méthodologie similaire. Avant de détailler la méthode appliquée pour la cartographie de l'aléa, la DDTM insiste, dans les rapports de présentation, sur l'absence de données sur les crues historiques⁴². Cette lacune s'explique par la faible intensité des phénomènes de crue et par le nombre réduit d'enjeux en zone inondable. Après avoir démontré la pertinence technique de l'hydrogéomorphologie pour ces deux cours d'eau affluents de la Somme, les services de l'Etat proposent de prendre en compte une cartographie hydrogéomorphologique pour la cartographie de l'aléa.

La réalisation des cartes d'aléa est totalement qualitative (Figure 44). Plusieurs types d'aléas sont distingués : ravinement, inondations par débordement de cours d'eau et par remontée de nappe. La réalisation des cartes d'aléa est accompagnée de la définition de cotes de référence utilisée par la suite dans le règlement. Pour l'aléa inondation de plaine les cotes de référence correspondent, comme pour l'aléa résiduel, à une surélévation par rapport au TN. En zone d'aléa faible, la cote de référence est celle du TN ; en zone d'aléa moyen elle correspond à TN+50 cm ; en zone d'aléa fort elle coïncide avec la cote TN+1 m. Concernant l'aléa ravinement, le même principe est appliqué, mais en prenant pour référence la cote du fond de vallon et non plus le TN de la parcelle.

⁴² DDTM de la Somme, 2008. Plan de Prévention des Risques Inondation du canton de Conty. Note de Présentation. 41 p.

DDTM de la Somme, 2008. Plan de Prévention des Risques Inondations de la commune de Mesnil-Martinsart. Note de Présentation. 33 p.

Figure 45 : Zonage réglementaire du PPRI de Mesnil-Matinsart (Source : DDTM80)

Cette pratique se retrouve dans d'autres départements. Elle concerne par exemple le PPRI de l'Yonne dans le secteur de Corbigny⁴⁴, le PPRI de la Divette⁴⁵, ou encore le PPRI du bassin de la Couze-Chambon⁴⁶. Tous ces PPRI possèdent la particularité d'être localisés dans la moitié Nord de la France, loin du foyer de l'hydrogéomorphologie en France, le Midi Méditerranéen.

2.3.4.5 Une pratique innovante de l'hydrogéomorphologie : le Modèle Numérique de Zone Inondable (MNZI)

La principale limite de l'hydrogéomorphologie concernant son utilisation réglementaire est l'absence de cote de crues. Afin de remédier à cette lacune, une méthodologie émerge dans certains PPRI : le Modèle Numérique de Zones Inondables (MNZI). Le principe de cette méthode est de réaliser la différence entre un Modèle Numérique de Ligne d'Eau (MNLE) et un MNT pour obtenir le MNZI, sous forme de hauteurs d'eau. La ligne d'eau peut être calée sur des données de crue historique, ou bien sur une cartographie hydrogéomorphologique. Dans les exemples présentés ci-dessous, les MNT utilisés sont de moyenne résolution (5 – 10 m). Ils utilisent la technologie de la photogrammétrie (PPRI de l'Yerres) ou sont issus de la BD ALTI de l'IGN.

Le PPRI de la basse vallée de la Touques⁴⁷ est le premier à utiliser la méthodologie du MNZI, sans pour autant nommer la méthode de la sorte. Afin de pallier l'absence de données hydrologiques suffisantes, la cote de référence du PPRI est constituée d'une ligne d'eau fondée sur des données de crues historiques en aval et sur une cartographie hydrogéomorphologique en amont.

Puis en 2012, ce sont trois PPRI qui sont approuvés avec la même méthodologie. Toujours dans la Région Basse-Normandie, c'est le PPRI de l'Orne amont⁴⁸, qui se trouve concerné. Les affluents font l'objet d'une cartographie hydrogéomorphologique classique. Une modélisation hydraulique est appliquée dans les zones urbaines qui bordent l'Orne. Les zones sans enjeux sont issues d'un MNZI hydrogéomorphologique. Le PPRI interdépartemental de l'Essonne⁴⁹ emploie dans sa portion amont un MNZI hydrogéomorphologique, tout comme le PPRI de l'Yerres (Figure 46).

Cette méthodologie qui se développe progressivement dans le bassin parisien est l'objet de communications de la part du CETE d'Ile-de-France. En 2008, (Guéro *et al.*, 2008) présentent la

⁴⁴ DDE de la Nièvre, 2008. Plan de Prévention du Risque Inondation de l'Yonne. Secteur de Corbigny. Note de présentation. 31 p.

⁴⁵ DDE de la Manche, 2007. Plan de Prévention des Risques naturels Prévisibles d'Inondation de 26 communes des bassins versants de la Divette, du Trottebec et des cours d'eau de l'agglomération cherbourgeoise. 134 p.

⁴⁶ Préfecture du Puy-de-Dôme, 2008. Plan de prévention des risques naturel inondation du bassin de la Couze-Chambon. Note de présentation. 47 p.

⁴⁷ DDE du Calvados, 2005. Plan de prévention des risques d'inondation de la basse vallée de la Touques. Note de présentation. 28 p.

⁴⁸ DDE du Calvados, 2008. Plan de Prévention des Risques d'Inondation de la basse vallée de l'Orne. Règlement. 28 p.

⁴⁹ DDT de l'Essonne, 2012. Plan de Prévention des Risques Naturels. Risque inondation de la vallée de l'Essonne dans les départements du Loiret, de Seine-et-Marne et de l'Essonne. Notice de Présentation. 53 p.

méthodologie envisagée pour le PPRI de l'Yerres. C'est à cette occasion que le terme de MNZI est employé pour la première fois. La même méthodologie est présentée en 2009 (Guéro et Willmes, 2009) pour aborder la réalisation d'un MNZI sur le Petit-Morin. La méthode est appliquée sur cet affluent de la Marne en vue du PPRI du Petit-Morin, prescrit en octobre 2012 et toujours en cours d'élaboration. Le MNZI revêt malgré tout un aspect encore très expérimental.

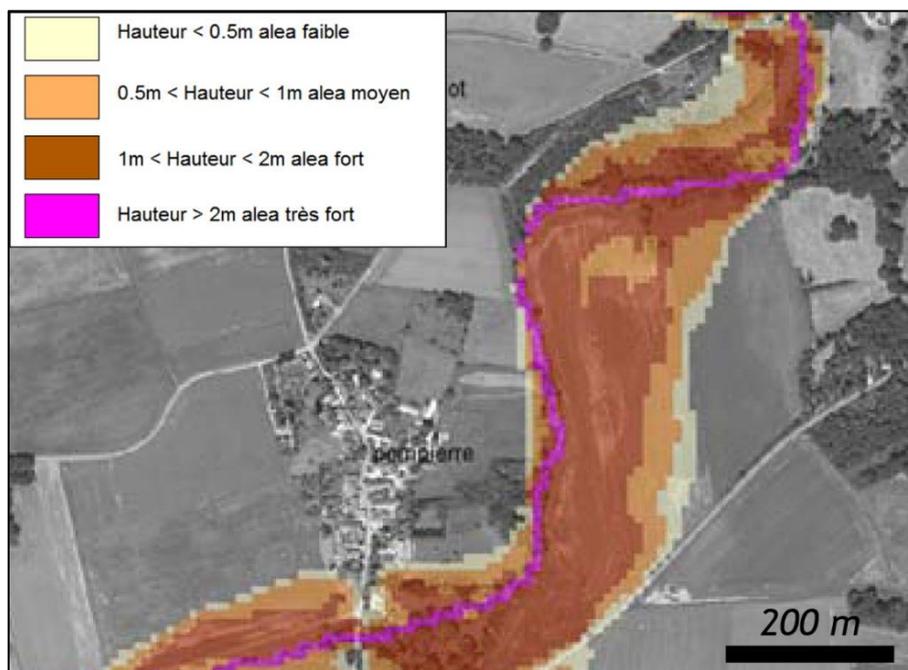


Figure 46 : PPRI de l'Yerres. Hauteurs d'eau issues du MNZI hydrogéomorphologique (Source : Guéro et al, 2008)

Les cinq exemples de MNZI cités ci-dessus ont la particularité d'être situés dans le Nord-Ouest de la France (Figure 47). De la même manière que pour les PPRI qui emploient l'hydrogéomorphologie comme aléa de référence, les MNZI concernent des cours d'eau à crue lente pour lesquels les vitesses d'écoulement sont peu significatives pour la définition de l'aléa.

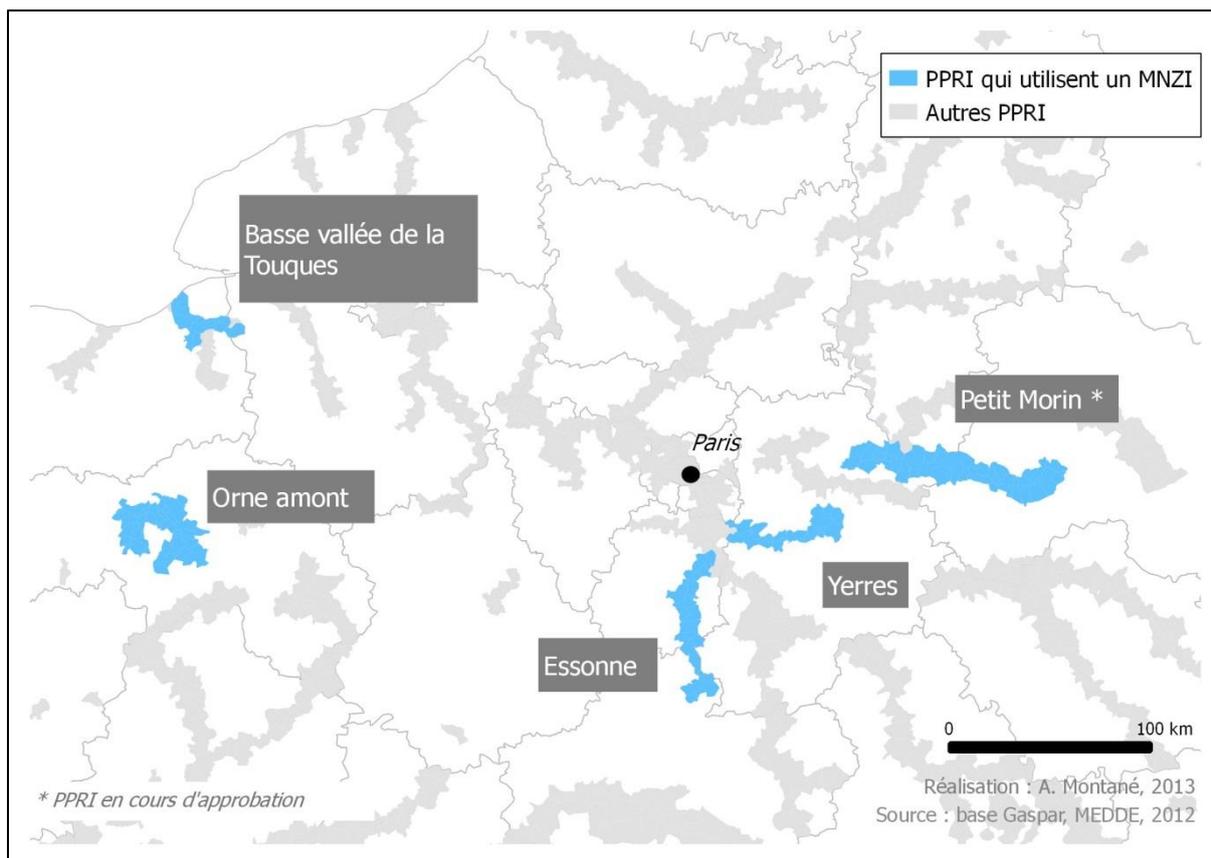


Figure 47 : Les PPRI qui emploient la méthode du MNZI pour la cartographie de l'aléa inondation

2.3.5 Prise en compte d'un évènement supérieur à la crue de référence sans cartographie hydrogéomorphologique : les pratiques

Dans le cadre d'un PPRI, la cartographie hydrogéomorphologique permet de définir des extensions de crues extrêmes voire des cotes grâce au MNZI. Cette recherche de scénarios maximum est perçue de plus en plus dans les notes méthodologiques des PPRI. En 1995, la crue centennale apparaissait comme une référence inaccessible. Mais au fil du temps et surtout des crues extrêmes qui ont dépassé des crues centennales, la prise en compte d'évènements supérieurs semble une évidence pour les services de l'Etat. Ce changement rejoint le principe de précaution introduit dans le droit français par la loi Barnier de 1995.

Deux pratiques émergent pour augmenter l'intensité de l'aléa pris en compte. La première est l'augmentation de quelques cm de la cote de référence. La deuxième consiste à prendre en compte une crue supérieure.

2.3.5.1 La « cote de sécurité »

Au sein d'un rapport méthodologique de PPRI, la définition de la crue de référence fait suite à une chronique des crues historiques comparée à une synthèse des débits statistiques calculés. Dans

plusieurs PPRI il y est totalement assumé que la cote de référence des PPRI est rehaussée de quelques cm. Seuls 6 PPRI sur les 282 étudiés présentent ce cas de figure.

Pour le PPRI de l'Ander⁵⁰, la cote de référence retenue est celle de la crue centennale modélisée, majorée de 20 cm. Le rapport du PPRI de la Charente amont⁵¹ précise que la cote de référence est celle de la crue de 1982 augmentée de 10 cm. Cette augmentation est justifiée par l'occurrence de crues en 1740 et 1779 considérées comme plus importantes. La documentation de ces crues est toutefois trop faible pour les utiliser en tant que crue de référence.

La notion de « cote de sécurité » est introduite dans le cadre du PPRI de de la vallée du Clain⁵². Sans donner plus de précisions, ce détail exprime une tendance à augmenter l'intensité de l'aléa pris en compte. Citons également le PPRI du Garon⁵³ avec un rehaussement de 20 cm par rapport à la crue centennale et le PPRI du Rhins et de la Trambouze⁵⁴ qui justifie l'augmentation de 30 cm par rapport à la crue centennale par « une marge de sécurité liée à l'incertitude et aux remous ». Enfin, le PPRI de la Vilaine amont⁵⁵ pour lequel la cote de référence correspond à la crue historique de 1974 surélevée de 30 cm.

2.3.5.2 La « crue exceptionnelle »

Une autre manière d'amplifier l'aléa inondation consiste à choisir ouvertement une crue de plus forte intensité.

Le PPRI du Grand Lyon⁵⁶ utilise pour la partie rhodanienne une combinaison entre deux aléas : une crue centennale et une « crue exceptionnelle » correspondant à un débit millénal. La combinaison entre ces deux types de crues est évoquée par une doctrine commune pour les PPRI du Rhône (DIREN Rhône-Alpes, 2006). D'un point de vue réglementaire, la crue millénale a sensiblement le même rôle que l'aléa résiduel provenant de l'hydrogéomorphologie. En zone non urbanisée, les nouveaux aménagements y sont très contraints et en zone urbaine le règlement prévoit pour la zone B1 (Figure 48) des interdictions de construire pour les ERP (Etablissement Recevant du Public), les centres accueillant des personnes à mobilité réduite ou encore les bâtiments utiles à la gestion de crise.

⁵⁰ DDE du Cantal, 2005. Plan de prévention des risques d'inondation. Bassin versant de l'Ander. Commune d'Andelat. Note de présentation. 28 p.

⁵¹ DDTM de Charente-Maritime, 2010. Révision des Plans de Prévention des Risques Naturels d'inondation des communes riveraines de la Charente, de Saintes à la limite amont du département. Commune de Saintes. Note de présentation. 97 p.

⁵² DDE de la Vienne, 2003. PPRI de la vallée du Clain. Secteur de Poitiers. Rapport de présentation. 115 p.

⁵³ DDE du Rhône, 2007. Plan de Prévention des Risques d'Inondation du Garon. Notice de présentation. 45 p.

⁵⁴ DDEA de la Loire, DDE du Rhône, 2009. Plan de prévention des risques naturels prévisibles d'inondation des rivières du Rhins et de la Trambouze. 27 p.

⁵⁵ DDE d'Ille-et-Vilaine, 2007. Plan de Prévention des Risques d'Inondation du bassin de la Vilaine amont. Note de présentation.

⁵⁶ Préfecture du Rhône (2008) - Plan de Prévention des Risques Naturels pour les inondations du Rhône et de la Saône sur le territoire du Grand Lyon. Note de présentation. Secteur Rhône aval. 27 p

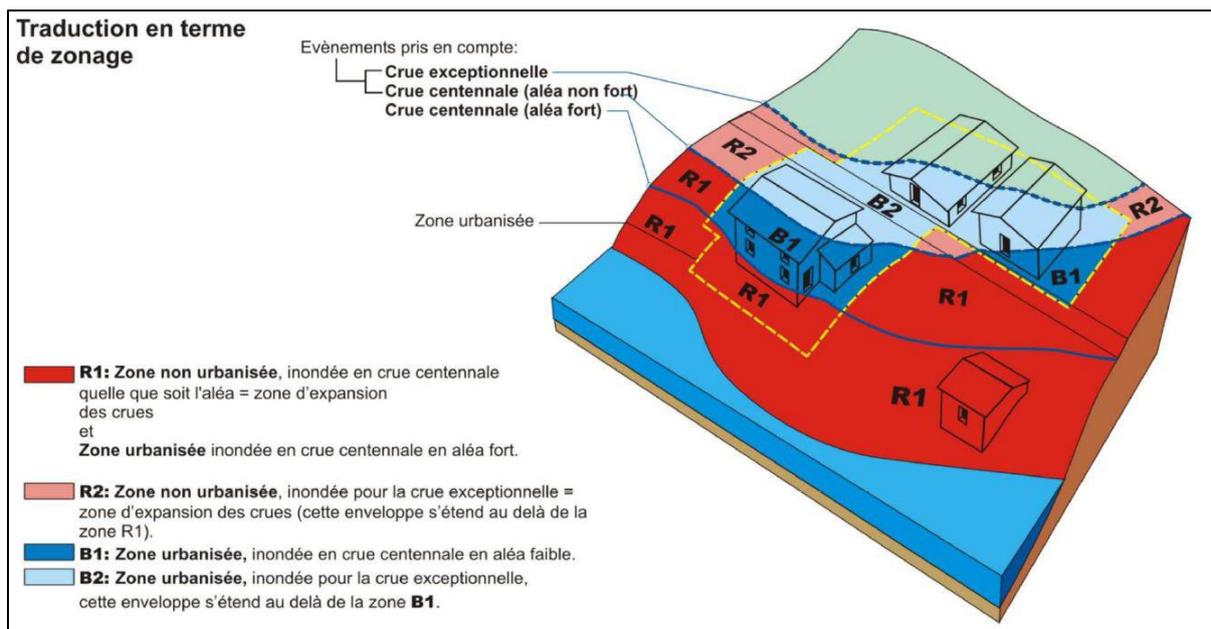


Figure 48 : Prise en compte d'une crue millénale « exceptionnelle » dans le PPRI du Grand Lyon
(Source : Service Navigation Rhône Saône)

Dans le Gard, la crue exceptionnelle reflète une pratique aujourd'hui abandonnée pour les PPRI. Elle se retrouve par exemple dans le PPRI de l'Arre inférieure⁵⁷. Le débit de la crue exceptionnelle est celui de la crue centennale multipliée par 1,8. Cette formulation trouve son origine dans un rapport destiné à estimer des débits de crue, dont la crue exceptionnelle (Bressan et Golossov, 1996). La crue exceptionnelle aujourd'hui abandonnée est remplacée par une combinaison entre la crue de référence et la cartographie hydrogéomorphologique. L'existence de cette pratique symbolise tout de même la prise de conscience, relativement précoce par rapport aux autres départements français, que la crue centennale ne suffit pas pour réglementer l'urbanisme en zone inondable. La DDTM des Landes⁵⁸ va jusqu'à afficher la certitude que les crues de référence constituent « des minima ».

L'appellation des types de crues peut être une source de confusion. Pour les exemples cités ci-dessus, le terme de « crue exceptionnelle » équivaut à un scénario supérieur à une crue centennale. En revanche le rapport du PPRI de l'Ousse⁵⁹ mentionne que la crue de référence est une « crue exceptionnelle de récurrence centennale ».

La surélévation de la crue de référence au-delà du niveau recommandé par les guides méthodologiques (Garry et Graszak, 1999) s'avère être une réalité. Nous sommes en droit de nous demander si cette pratique non mentionnée dans la grande majorité des autres PPRI ne constitue pas un non-dit. Il sera toutefois difficile de répondre à cette question qui relève des choix menés en interne par les services techniques de l'Etat. Néanmoins, il est certain que la volonté de prendre en compte des crues

⁵⁷ DDE du Gard, 1998. Plan de Prévention des Risques. Note de Présentation. Arre inférieure. Communes de Molières-Cavaillac, Avèze et Le Vigan. Nîmes. 20 p.

⁵⁸ DDTM des Landes, 2010. Plan de Prévention des Risques Inondation de la Midouze. Commune de Tartas. Rapport de présentation. 28 p.

⁵⁹ Préfecture des Pyrénées-Atlantiques, 2003. Plan de Prévention du Risque Inondation. Commune de Nousty. Note de présentation. 16p.

supérieures à la crue de référence des PPRI existe. Celle-ci se heurte souvent à un vide juridique ou technique.

2.3.6 Variables clés dans émergence de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI

Les analyses statistiques multivariées ont pour principal objectif de décrire et d'explorer la distribution de plusieurs variables (Sanders, 1990). L'AFCM (Analyse Factorielle des Correspondances Multiples) est une variante de l'AFC adaptée aux tableaux de contingence multiple, permettant de croiser n variables qualitatives (Dumolard, 2011). Les six variables étudiées sont présentées dans le Tableau 4.

A travers cette analyse nous cherchons à décrire ce qui détermine l'emploi de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI. Les interprétations sont fondées sur les oppositions visibles sur les axes F1 et F2. Ces deux axes présentent un pourcentage d'inertie cumulée de 63 %, dont 41 % pour le seul axe F1 (Tableau 5).

Le premier axe factoriel est marqué par une opposition entre les PPRI qui emploient de l'hydrogéomorphologie et ceux qui n'en emploient pas (Figure 49). L'axe F2 structure également l'information relative à l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique. L'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique en tant qu'aléa de référence se trouve excentré par rapport aux autres modalités. Le faible nombre d'individus ne permet pas de commenter leur position. La redondance entre les deux modalités les exclut de l'interprétation. La représentation des individus (Figure 50) met en évidence la même logique sur les axes F1 et F2. Notons que tout comme pour la représentation des variables, les individus concernés par l'hydrogéomorphologie en tant qu'aléa de référence présentent des valeurs qui s'écartent du nuage de point principal. Aux extrémités du nuage de points nous trouvons des PPRI dont les caractéristiques et surtout la prise en compte de l'hydrogéomorphologie s'opposent.

Variable	Modalités	Effectifs (nb de PPRI)	%	Coordonnées principales	
				F1	F2
Source du document	DDT	140	49,6	0,43	-0,02
	Internet	25	8,9	-0,47	0,31
	Cartorisque	117	41,5	-0,42	-0,04
Période d'approbation du PPRI	1985 - 2003	101	35,8	-0,52	0,06
	2004 - 2007	107	37,9	-0,25	0,25
	2008 - 2012	74	26,2	1,06	-0,44
Période de prescription du PPRI	1995 - 2003	238	84,4	-0,21	0,11
	2004 - 2007	35	12,4	1,05	-0,27
	2008 - 2010	9	3,2	1,56	-1,85
Crue historique la plus récente dans le département du PPRI	1836 - 1900	32	11,3	0,23	-0,01
	1901 - 1950	40	14,1	0,01	-0,60
	1951 - 1980	39	13,8	-0,05	-0,35
	1981 - 2007	85	30,1	0,57	-0,41
	Pas de crue historique > Q100	86	30,5	-0,62	0,84
Utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique	Non	192	68,1	-0,35	0,10
	Cité	21	7,5	-0,13	-0,10
	Zones sans enjeux	41	14,5	0,35	0,43
	Résiduel	22	7,8	1,28	-1,30
	Référence	6	2,1	4,47	4,76
Aléa de référence	Carto HGM	6	2,1	4,47	4,76
	Non déterminé	3	1,1	-1,63	1,23
	Crue centennale	147	52,1	-0,41	0,35
	Crue historique	126	44,7	0,30	-0,67

Tableau 4 : Variables de l'AFCM

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	0.38	0.33	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17	0.17
Inertie (%)	13.58	11.56	8.35	7.66	6.96	6.66	6.15	5.95
% cumulé	13.58	25.14	33.49	41.15	48.11	54.77	60.92	66.87
Inertie ajustée	0.07	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Inertie ajustée (%)	41.05	22.29	4.23	2.19	0.80	0.42	0.05	0.00
% cumulé	41.05	63.34	67.57	69.76	70.57	70.99	71.04	71.04

Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentages d'inertie de l'AFCM

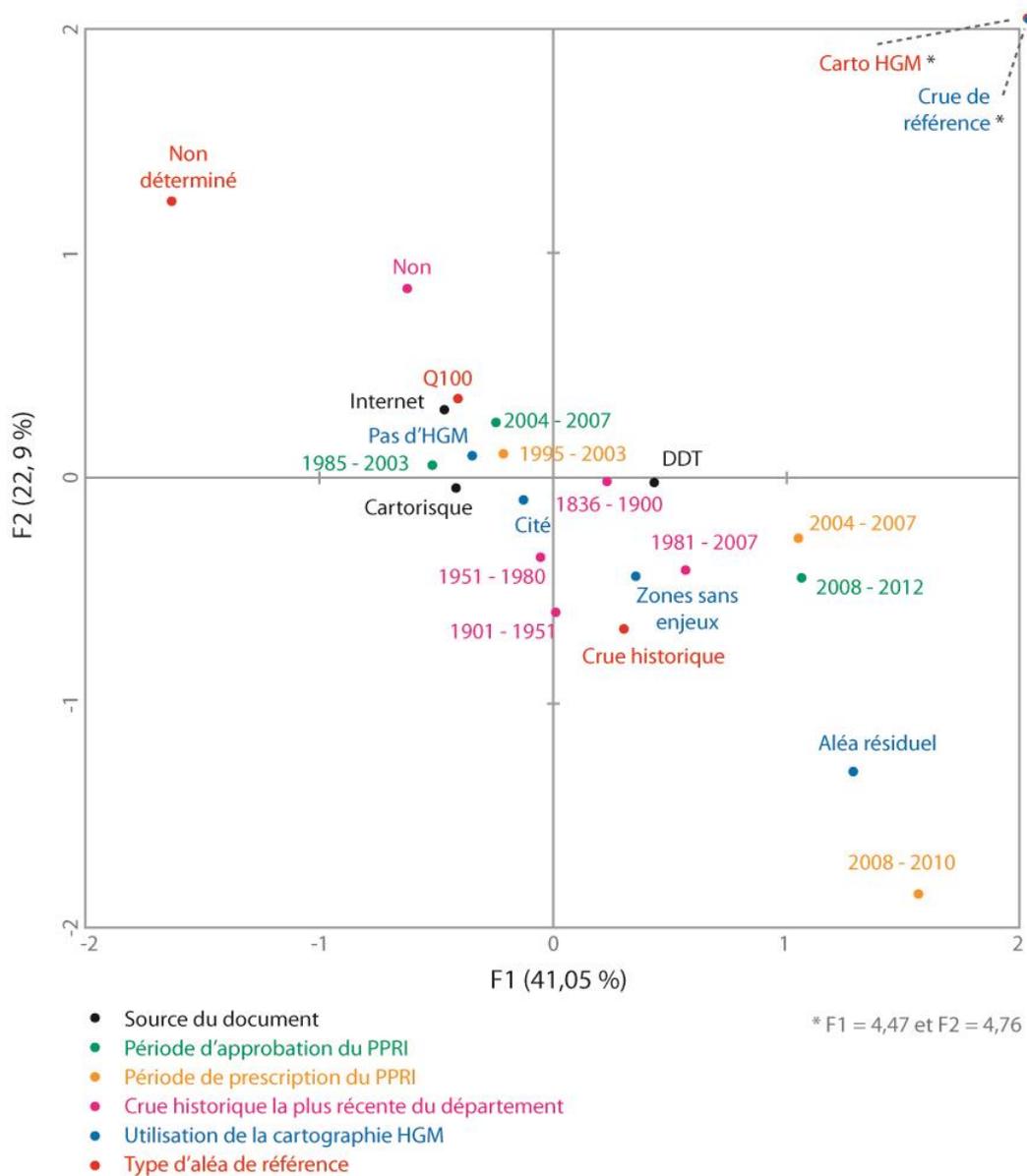


Figure 49 : Coordonnées principales des variables sur les axes F1 et F2

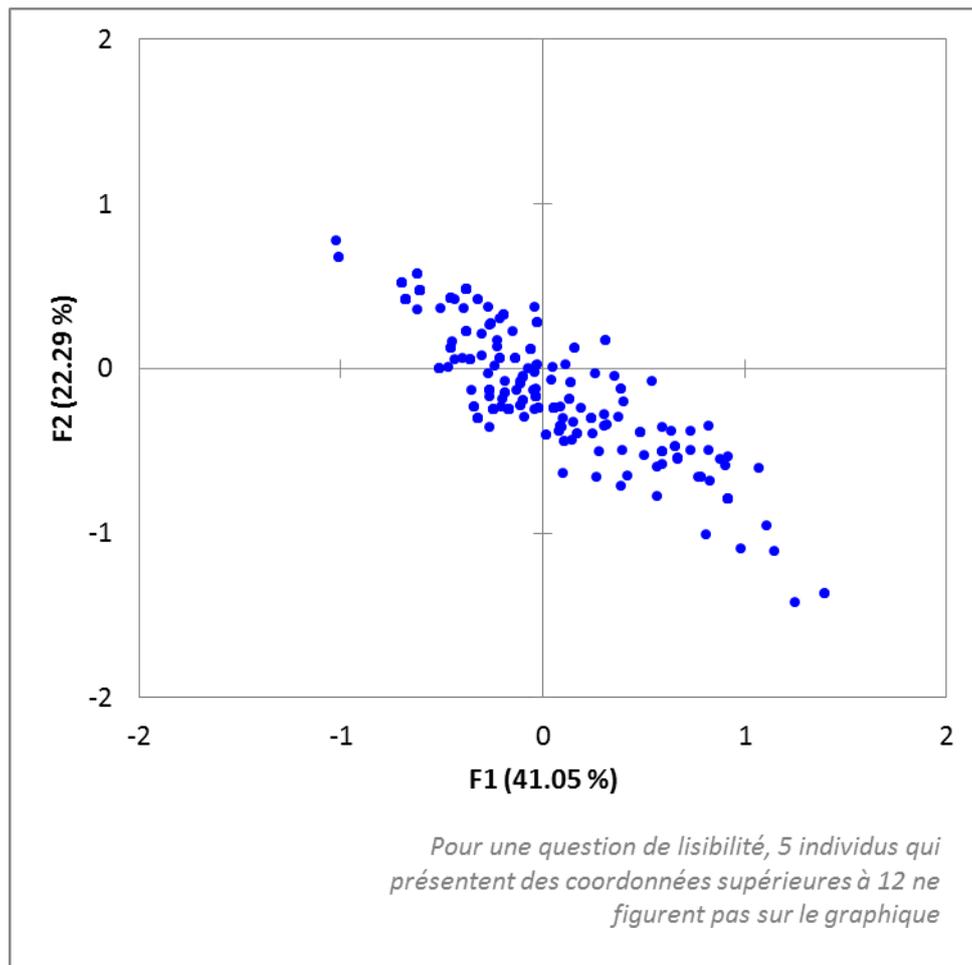


Figure 50 : Coordonnées principales des individus sur les axes F1 et F2

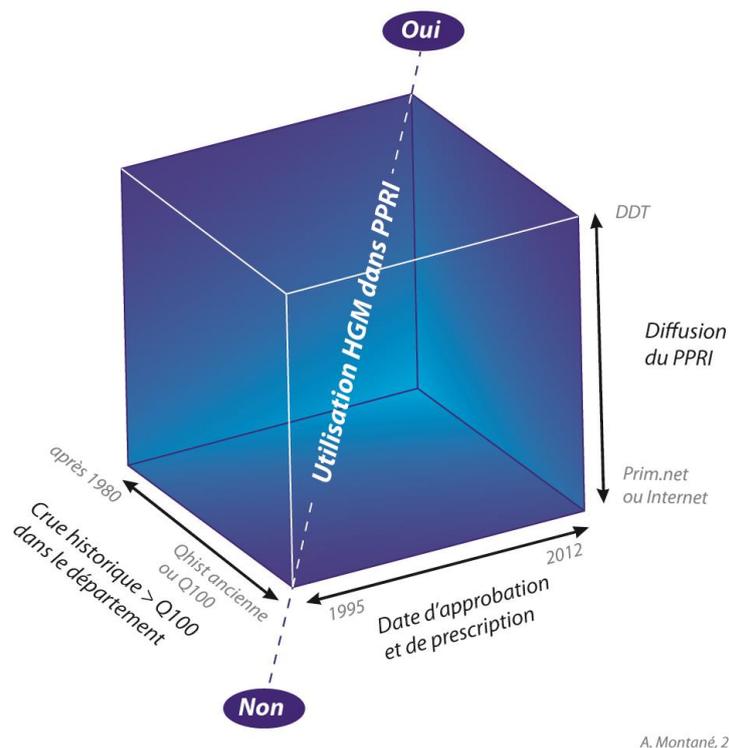
L'opposition mise en avant par l'AFCM est traduite par la Figure 51. De manière schématique il apparaît que les PPRI qui prennent en compte une cartographie hydrogéomorphologie sont des PPRI récents. Ceux-ci sont plutôt diffusés par le site internet d'une DDT et ils se situent dans un département qui a récemment connu une crue extrême. Citons par exemple les PPRI de la basse-plaine du Vidourle⁶⁰ et du Boulès⁶¹, approuvés en 2012, qui emploient tous les deux un aléa résiduel. Au contraire, les PPRI où l'hydrogéomorphologie n'est pas prise en compte font partie des documents de première génération, ils sont majoritairement diffusés sur la plateforme Cartorisque ou sur internet. Ces PPRI se situent principalement dans des territoires qui n'ont pas connu de crues extrêmes récentes. C'est par exemple le cas du PPRI de l'Arve⁶² et du PPRI de l'Artière⁶³. Ce sont des documents approuvés au début des années 2000, dans lesquels la cartographie hydrogéomorphologique n'est même pas citée.

⁶⁰ DDTM du Gard, 2012a. Plan de Prévention des Risques Inondation. Basse plaine Camargue Gardoise. Commune de Saint-Laurent-d'Aigouze. Rapport de présentation. 59 p.

⁶¹ DDTM des Pyrénées-Orientales, 2012b. Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles. Risque Inondation. Bassin versant du Boulès. Commune de Bouleternère. 54 p.

⁶² Préfecture de la Haute-Savoie, 2001. P.P.R Inondation de l'Arve. Commune d'Ayze. 100 p.

⁶³ Mission interministérielle des risques naturels du Puy-de-Dôme, 2002. Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles Inondation. Bassin de l'Artière. Note de présentation. 13p.



A. Montané, 2012

Figure 51 : Représentation des variables reliées à l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI

Le moteur de l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique est l'occurrence récente de crues extrêmes. Dans le cas où un territoire est sujet à des événements récents, la perception de l'aléa inondation par les services de l'Etat en est modifiée. La gestion du risque inondation devient un sujet de préoccupation majeure qui mérite de faire l'objet d'une communication plus poussée, notamment par la diffusion des PPRI sur leur site internet. Par ailleurs, l'idée qu'une crue de référence puisse être dépassée par une inondation qui remplit entièrement le lit majeur s'impose dans les esprits. La cartographie hydrogéomorphologique devient une solution simple pour envisager cette éventualité.

Un exemple qui illustre bien ce basculement est celui des événements qui touchèrent le Var en 2010. Avant les inondations qui concernent essentiellement la vallée de l'Argens et en particulier la ville de Draguignan, riveraine de la Nartuby, les PPRI avaient pour référence une crue centennale modélisée⁶⁴. Après les inondations qui ont entraîné la mort de 23 personnes (Collombat, 2012), une cartographie hydrogéomorphologique est intégrée pour les nouveaux PPRI prescrits sur tout le bassin de l'Argens⁶⁵.

Un des principaux atouts de la cartographie hydrogéomorphologique mis en avant dans la littérature est de proposer un complément pour les cours d'eau qui disposent de peu d'informations sur les crues historiques (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996). Pourtant, celle-ci s'implante plus facilement dans les territoires qui disposent de données plus importantes et plus récentes. Ce paradoxe s'explique

⁶⁴ DDE du Var, 2005. Plan de prévention des risques prévisibles (P.P.R.). Commune de Draguignan. Note de présentation. 38 p.

⁶⁵ DDTM du Var, 2012. Plan de Prévention des Risques Naturels d'Inondation. Commune de Vidauban. Cartographie des aléas.

par une culture du risque et surtout une culture des événements extrêmes qui ne font pas partie de l'histoire mais de l'actualité.

A l'opposé, il subsiste des territoires quasiment imperméables à l'hydrogéomorphologie. Ces territoires sont caractérisés par une relative ancienneté des crues historiques de référence. Les services techniques de l'Etat semblent s'accommoder de cette situation où la crue référence des PPRI reste une crue historique ou une crue centennale modélisée. Le nombre restreint de crues récentes qui dépassent la crue de référence confèrent à celle-ci un aspect immuable. Dans ce contexte, la crue de référence s'apparente à une réalité figée dans le temps. Les gestionnaires considèrent que l'hydrogéomorphologie, qui met souvent en avant une enveloppe de crue plus large, n'y a pas sa place.

2.4 Conclusions

Ce chapitre avait pour objectif de définir le rôle joué par la cartographie hydrogéomorphologique au sein de la politique de gestion du risque inondation en France. Cette question est tout d'abord traitée grâce à des questionnaires visant à connaître la représentation que s'en font les services techniques de l'Etat. Une analyse des méthodes employées pour la réalisation des PPRI vient compléter le premier point.

L'avis des services techniques de l'Etat (DREAL et DDT) sur la cartographie hydrogéomorphologique est homogène. Les fondements de la méthode ne sont pas remis en question. Beaucoup admettent que la cartographie est un outil intéressant en amont d'une modélisation hydraulique, en raison de son aspect maximal des zones inondables et surtout de son faible coût. Les critiques portent sur son intégration dans les PPRI. En effet, l'absence de cotes de crue et de hauteur se révèle être une véritable lacune pour l'application de normes d'urbanisme.

L'analyse des PPRI confirme la faible adhésion ressentie à l'égard de la cartographie hydrogéomorphologique. La majorité des PPRI n'emploie pas l'hydrogéomorphologie pour la cartographie de l'aléa. La tendance est toutefois à l'augmentation de l'utilisation de l'hydrogéomorphologie au fil du temps. Lorsque l'hydrogéomorphologie est prise en compte dans la cartographie de l'aléa c'est principalement pour représenter les zones inondables des affluents et des zones sans enjeux. La présence ou non d'AZI hydrogéomorphologiques joue un rôle prépondérant pour l'utilisation postérieure dans un éventuel PPRI.

Bien que minoritaires, des pratiques innovantes apparaissent, tant sur le plan règlementaire que technique. Les crues extrêmes qui ont touché les cours d'eau du Sud de la France durant les années 1990 et 2000 ont apporté une légitimité technique à la cartographie hydrogéomorphologique. Dans ces régions, l'éventualité qu'une crue de référence centennale puisse être dépassée par une crue future devient tout à fait probable. En conséquence, la cartographie hydrogéomorphologique fait partie intégrante du diagnostic de l'aléa, ainsi que du zonage règlementaire. Afin de s'affranchir de l'absence de cote de référence, les DDT appliquent leurs prescriptions à partir de quelques dizaines de cm au-dessus du terrain naturel. Ces prises en compte de la cartographie hydrogéomorphologique reflètent la capacité des PPRI à adapter leur méthodologie aux caractéristiques locales de territoires concernés (Pigeon, 2007).

Une autre innovation, cantonnée à quelques PPRI du bassin parisien et à la Normandie, permet d'obtenir des cotes qui correspondent à une cartographie hydrogéomorphologique. C'est le Modèle Numérique de Zones Inondables (MNZI). Cette méthodologie qui reste très confidentielle peut constituer un complément à l'interprétation hydrogéomorphologique classique. Elle peut permettre de participer à une meilleure communication auprès du grand public, de faciliter l'instruction des PPRI et de représenter la crue extrême demandée dans le cadre de la phase de cartographie de la « Directive Inondation ».

Un changement de pratique ne peut être un succès que si les acteurs concernés par celui-ci le considèrent comme un progrès. Si l'hydrogéomorphologie est perçue comme une méthode dont le seul intérêt est d'être moins cher qu'une modélisation hydraulique, le changement ne peut pas être effectif. Afin de faire évoluer cette vision de la cartographie hydrogéomorphologique, il nous faut envisager des apports d'un point de vue cartographique, géomorphologiques et réglementaires.



Chapitre 3

Le MNZI, un renouvellement efficace de la cartographie hydrogéomorphologique

La cartographie hydrogéomorphologique présente un défaut majeur : l'absence de hauteurs d'eau et surtout de cotes de crues. Cette lacune se fait ressentir dans le discours des services techniques de l'Etat français. Malgré quelques territoires qui s'affranchissent du caractère qualitatif de la donnée, une majorité de gestionnaires mettent la cartographie hydrogéomorphologique de côté. Ils lui reprochent en particulier une incompatibilité avec les actes d'urbanismes qui nécessitent une cote de crue. Il serait cependant opportun de nuancer cette observation. Le choix de la cote de crue est fortement influencé par les guides méthodologiques publiés par le ministère en charge du risque d'inondation. Or, ces guides insistent sur la définition de la crue de référence comme la crue centennale ou une crue historique si celle-ci est supérieure (Garry et Graszak, 1999).

La mise en place de la « Directive Inondation⁶⁶ » permet d'envisager l'utilisation plus systématique de la cartographie hydrogéomorphologique. En particulier grâce à l'introduction du concept de « crue de faible probabilité » que nous nommerons par la suite crue extrême. La représentation cartographique de ce scénario de crue est envisagée par le MEDDE⁶⁷ grâce à la modélisation de crue millénales ou grâce à la représentation des hauteurs d'eau correspondant au lit majeur.

La cartographie hydrogéomorphologique doit également évoluer pour des raisons de communication. Cette méthode reste simple à expliquer lors de visites de terrain, par exemple avec des élus. La représentation des hauteurs d'eau peut constituer un atout pour la compréhension du phénomène de crue extrême.

Afin de combler ces lacunes, nous proposons de produire des MNZI (Modèles Numériques de Zone Inondable). Cette méthode évoquée dans le chapitre 2 est déjà employée dans le cadre de plusieurs PPRI du Bassin Parisien et de Basse-Normandie (Guéro et Willmes, 2009; Guéro *et al.*, 2008).

Le premier objectif de ce chapitre est de produire des MNZI pour six corridors fluviaux contrastés, en France et au Québec. Le deuxième objectif consiste à examiner trois potentiels du MNZI. Nous examinerons le potentiel analytique et notamment l'apport des MNT LiDAR. Ensuite, nous réfléchirons au potentiel communicationnel de l'approche, en particulier sa complémentarité avec la cartographie hydrogéomorphologique. Et enfin, nous évoquerons son potentiel règlementaire, en particulier pour la « Directive Inondation ».

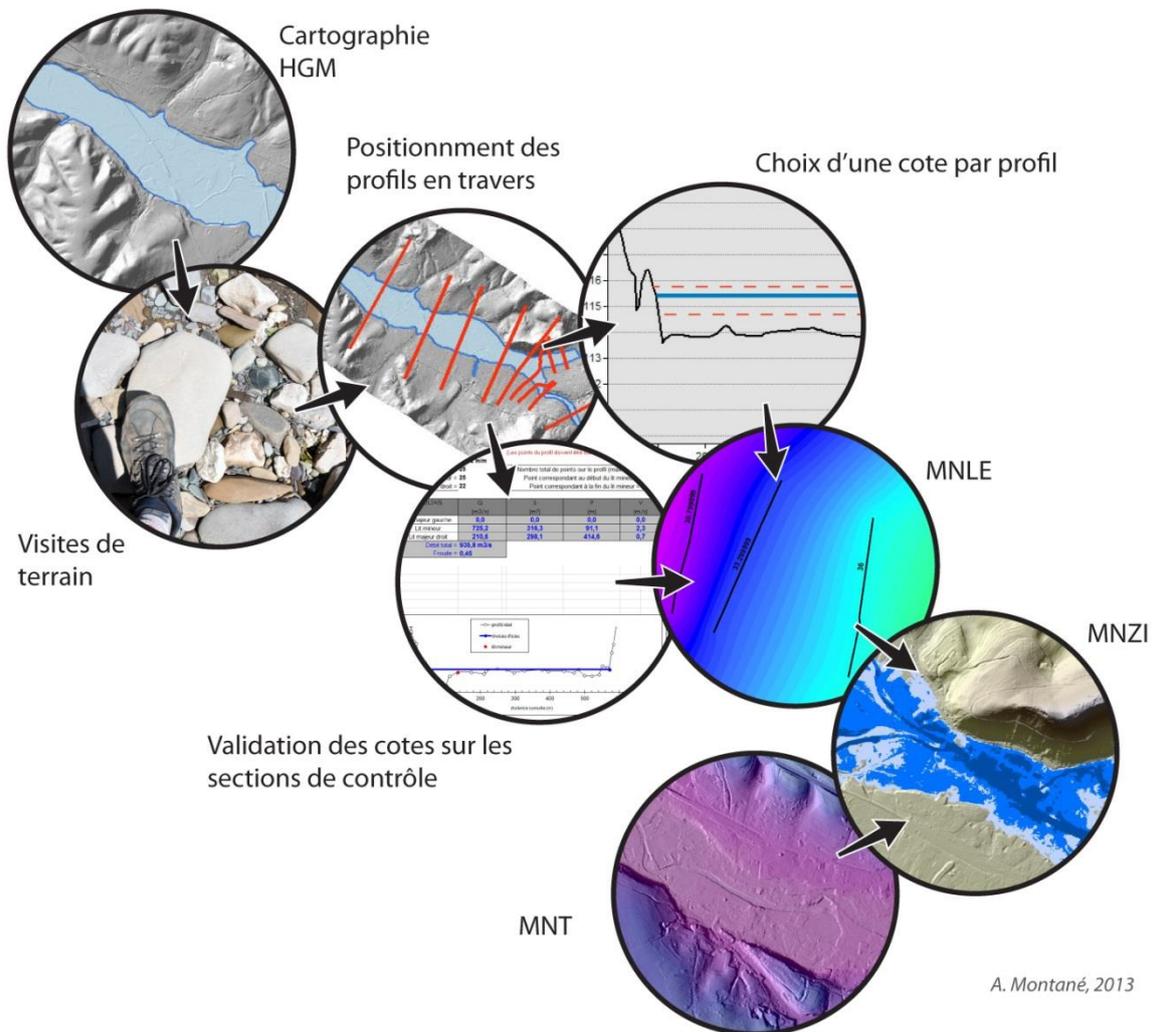
⁶⁶ Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Journal officiel de l'Union européenne du 06/11/2007. ([lien](#))

⁶⁷ MEDDE, 2012. Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (No. DEVP1228419C). Texte non paru du Journal Officiel. 40 p.

3.1 Le MNZI : définition, réalisation et valorisation potentielle

3.1.1 Définition et réalisation d'un MNZI

Un MNSE⁶⁸ (Modèle Numérique de Surface en Eau) correspond à toute cartographie de hauteurs d'eau issue de la différence entre un MNT et un MNLE (Modèle Numérique de Ligne d'Eau), dont les cotes correspondent à un scénario de crue. Le MNZI est un cas particulier de MNSE pour lequel la ligne d'eau correspond à une crue qui remplit entièrement le lit majeur. Ces hauteurs d'eau permettent de quantifier ce que le géomorphologue perçoit sur le terrain lorsqu'il observe les zones inondables. La production d'un MNZI est décomposée en six grandes étapes (Figure 52).



A. Montané, 2013

Figure 52 : Elaboration d'un MNZI

⁶⁸ Wikhydro : Croisement des données d'inondation avec le LiDAR. (http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Croisement_des_donn%C3%A9es_d'inondations_avec_le_LIDAR)

La réalisation du MNZI débute par la réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique. Pour être plus précis nous cherchons uniquement à obtenir la délimitation des zones inondables. Il est possible de réutiliser une cartographie existante, comme par exemple un AZI, ou bien de réaliser la cartographie en interprétant le LiDAR. La seconde étape consiste à réaliser des visites de terrain qui permettent de valider les limites des zones inondables et de mieux comprendre le fonctionnement du cours d'eau. Le positionnement des profils en travers fait suite à la visite de terrain et à une analyse des discontinuités du cours d'eau. Les profils sont placés de manière à représenter le plus fidèlement la géométrie de la zone inondable. La détermination des cotes de crue est issue d'une combinaison entre une interprétation de la topographie par profil et une validation via des sections de contrôle par un calcul d'hydraulique simplifié. Une fois les cotes de crue validées pour chacun des profils, on procède à l'interpolation entre ceux-ci, afin d'obtenir le MNLE. Enfin la dernière étape reste la soustraction entre la topographie et la ligne d'eau (Figure 53).

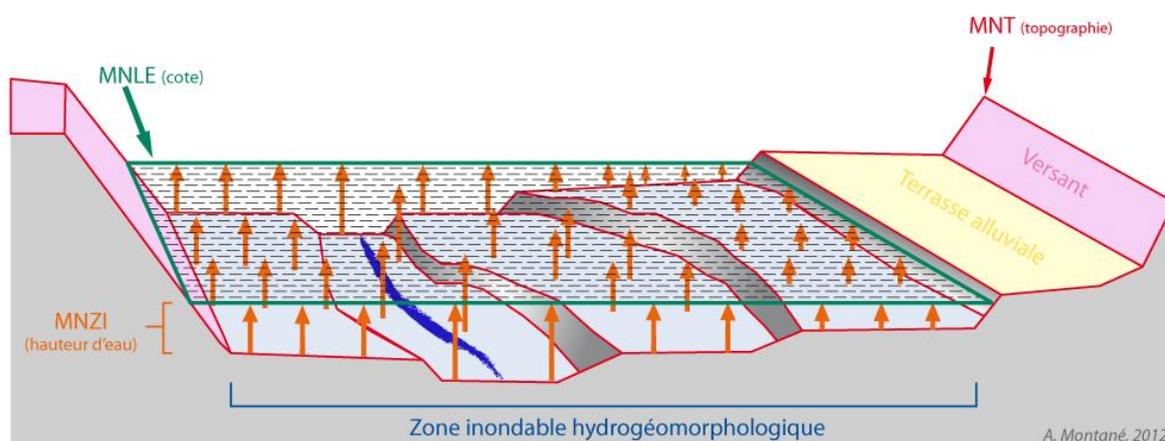


Figure 53 : Vue en travers d'un MNZI

3.1.1.1 Développement de la donnée LiDAR

Dans le cadre de la réalisation des MNZI, la donnée LiDAR prend une place importante. Il convient donc de définir les caractéristiques de ce type de donnée topographique et ses utilisations actuelles.

Le LiDAR aéroporté (pour *Light Detection And Ranging*) devient une technologie incontournable pour l'acquisition de données topographiques sous forme de MNT (Modèle Numérique de Terrain) (Chow et Hodgson, 2009; Mallet et Bretar, 2007). La précision altimétrique d'environ 15 cm (Hodgson *et al.*, 2005) et les hautes résolutions (1 m) permettent de travailler à des échelles plus fines qu'avec les MNT à faible résolution. Le principe du LiDAR aéroporté (Figure 54) se trouve dans l'émission d'impulsions laser, ensuite renvoyées par la surface terrestre. Un capteur embarqué dans l'avion interprète ces signaux qui permettent de produire une distance. Cette distance, couplée à un GPS différentiel, rend possible la détermination d'altitudes (Mallet et Bretar, 2007).

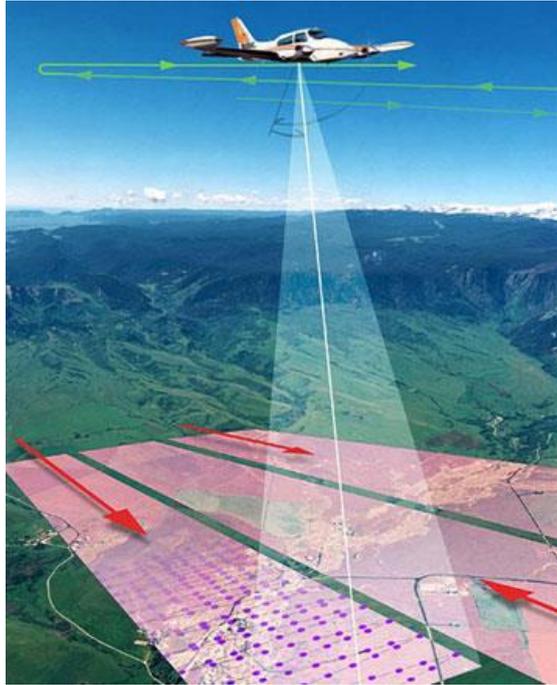


Figure 54 : Principe du LiDAR aéroporté (Source : CETE Normandie-Centre)

Les utilisations d'une telle donnée sont multiples. En matière de modélisation hydraulique, l'utilisation optimale du LiDAR s'avère être les modèles bidimensionnels (2D) grâce à l'abondance de données topographiques. Une utilisation monodimensionnelle équivaut à une perte d'informations (Marks et Bates, 2000; Roux, 2004; Sanders, 2007). Le développement progressif de cette nouvelle donnée entraîne des modifications dans les méthodes employées par les géomorphologues (Wilson, 2012), par exemple pour l'étude de la morphologie des chenaux (Biron *et al.*, 2013; Charlton *et al.*, 2003). L'étude des lits fluviaux constitue un champ de recherche pour lequel le LiDAR est un atout indéniable. C'est ce que démontrent Greco *et al.* (2008) qui présentent une méthodologie pour calculer l'altitude de la plaine alluviale par rapport au chenal d'écoulement. Stout et Belmont (2013). Ils ont également développé l'outil « TerEx » qui permet d'extraire de manière semi-automatisée des surfaces alluviales à partir d'un MNT LiDAR. Le CETE Méditerranée se penche également sur l'utilisation du LiDAR pour la cartographie hydrogéomorphologique. Dans le cadre des réflexions à mener pour la « Directive Inondation », le travail de Jérôme Alvarez (2012) met en avant comment identifier les ruptures de pente entre les unités hydrogéomorphologiques.

Les MNT LiDAR ont pendant longtemps conservé un aspect expérimental. Ils font aujourd'hui partie intégrante des données indispensables dès lors qu'une étude concerne la géomorphologie fine d'un cours d'eau. L'Etat français a compris l'intérêt de la donnée. Il a décidé dans le cadre de la « Directive Inondation », de couvrir les principaux cours d'eau en LiDAR. La Figure 55 illustre la couverture des cours d'eau français envisagée par la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques).

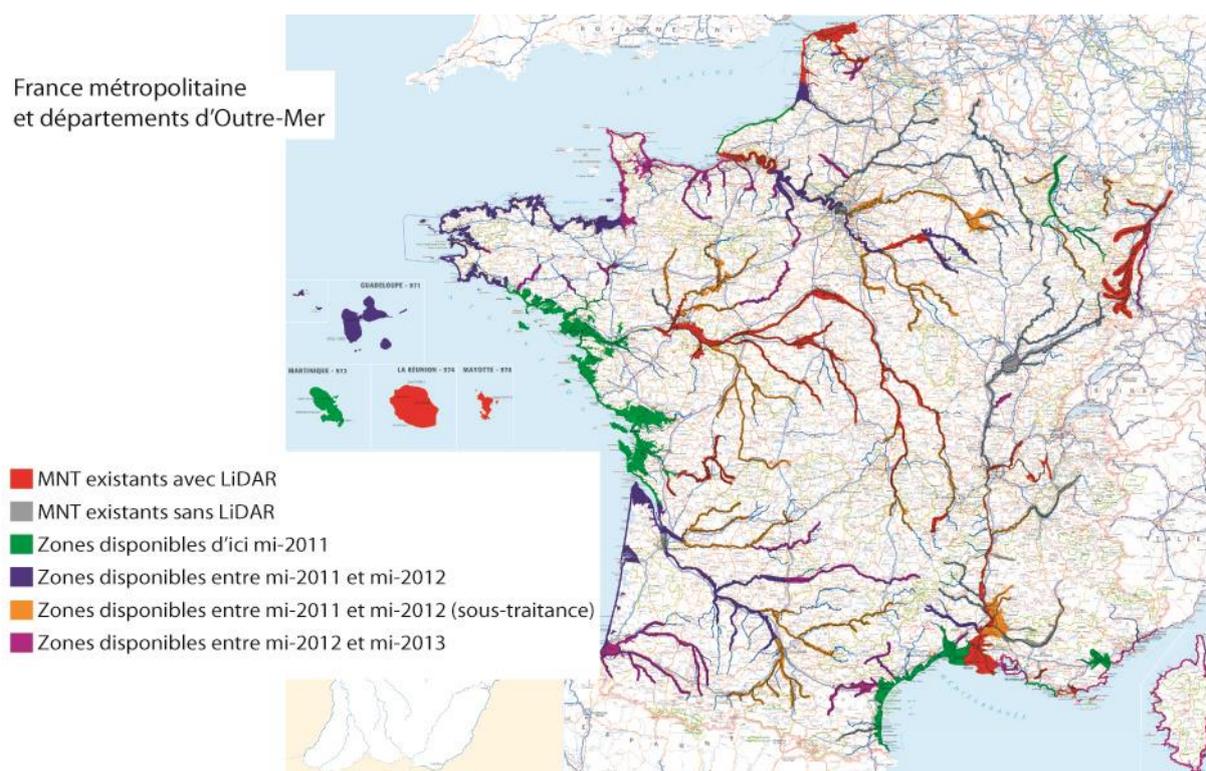


Figure 55 : La couverture LiDAR des cours d'eau français pour la « Directive Inondation » (source : DGPR)

Dans le cadre de la réalisation d'un MNZI, les MNT LiDAR constituent l'élément de départ de l'interprétation hydrogéomorphologique, mais aussi une donnée indispensable pour représenter les hauteurs d'eau finales.

3.1.1.2 Réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique

Dans le cas où la cartographie hydrogéomorphologique n'est pas disponible, il est nécessaire de la réaliser en interprétant le MNT LiDAR. Entreprendre ce type de cartographie permet de mettre en évidence les potentialités d'un MNT LiDAR pour la détermination des zones inondables. Cela présente l'opportunité d'étudier les caractéristiques géométriques des unités hydrogéomorphologiques.

3.1.1.2.1 Ce que recherche le géomorphologue

Avant de présenter les outils à disposition du géomorphologue, intéressons-nous à la méthodologie employée pour cartographier les zones inondables par photo-interprétation. La délimitation entre le lit majeur et l'encaissant est l'objet central de la cartographie hydrogéomorphologique. Comme défini par Masson *et al.* (1996) ou encore Nanson et Croke (1992), le lit majeur est une surface subhorizontale située à proximité immédiate du cours d'eau. Afin d'appliquer cette définition, le géomorphologue procède par grandes étapes.

La première étape consiste à éliminer des zones inondables les surfaces qui ne correspondent clairement pas à la définition. C'est le cas des versants qui se détachent du lit majeur par leur altitude relative élevée et leur pente importante. Ensuite le regard se porte sur le chenal. En effectuant des observations latérales, on observe le lit majeur adjacent au lit mineur, ou au lit moyen si l'hydrodynamisme du cours d'eau s'y prête. La limite de la zone inondable correspond à la première rupture de pente visible latéralement. Cette rupture de pente possède une netteté différente selon le milieu physique. Pour être valable, la limite de zone inondable doit être comparée avec les limites de zones inondables dans des portions situées en amont et en aval du cours d'eau. Ces observations qui sont d'ordre géométrique sont ensuite associées à des observations de l'occupation du sol.

3.1.1.2.2 *Les atouts du LiDAR pour la cartographie hydrogéomorphologique*

Dans le cadre de la réalisation du MNZI, la détermination des zones inondables se matérialise par la représentation d'un polygone directement dans le logiciel de SIG. Le logiciel ArcGIS est utilisé tout le long des expérimentations. L'ouverture d'un MNT LiDAR sur ArcGIS permet tout d'abord de visualiser les altitudes du terrain naturel. Cependant pour comprendre de manière efficace la géomorphologie d'un cours d'eau il est nécessaire de lui associer des fichiers rasters dérivés de celui-ci (Figure 56).

Comme moyen de percevoir le relief, citons en premier lieu citons l'ombrage. C'est la forme la plus élémentaire de représentation secondaire d'un MNT LiDAR. En simulant un éclairage du relief, il devient possible par observation du MNT de spatialiser des formes et en particulier des formes issues d'une dynamique fluviale (Höfle et Rutzinger, 2011; Notebaert *et al.*, 2009)

Pour plus de lisibilité des altitudes, par exemple pour évaluer la dissymétrie entre deux rives, un MNT représenté par une échelle de couleurs continues ne suffit plus. L'échelle de couleur doit être discrétisée par exemple avec un intervalle de 1 m, voire de 0,5 m pour les secteurs de faible pente qui nécessitent une interprétation plus fine.

Ensuite, la carte de pentes ici exprimées en %, apporte des informations cruciales. L'échelle continue de couleurs donne un aperçu des grandes variations de pente sur la zone d'étude, mais elle n'est pas utilisable en raison de la difficulté à associer une couleur à une valeur de pente. En revanche, la version discrétisée du raster permet de mieux différencier les valeurs de pentes associées au lit majeur et à l'encaissant. Comme nous le verrons dans les résultats, la valeur de pente qui établit la limite entre le lit majeur et l'encaissant varie d'un cours d'eau à l'autre, en fonction de l'énergie du cours d'eau. Par ailleurs, la superposition des deux rasters (altitude et pente) avec une échelle de couleur discrétisée se révèle très utile en raison de la lecture immédiate des unités hydrogéomorphologiques.

Enfin, la visualisation de profils topographiques nous permet de vérifier rapidement la forme de la plaine alluviale. La combinaison entre la vue en plan et la vue en coupe reste un outil efficace à utiliser en particulier pour les secteurs complexes.

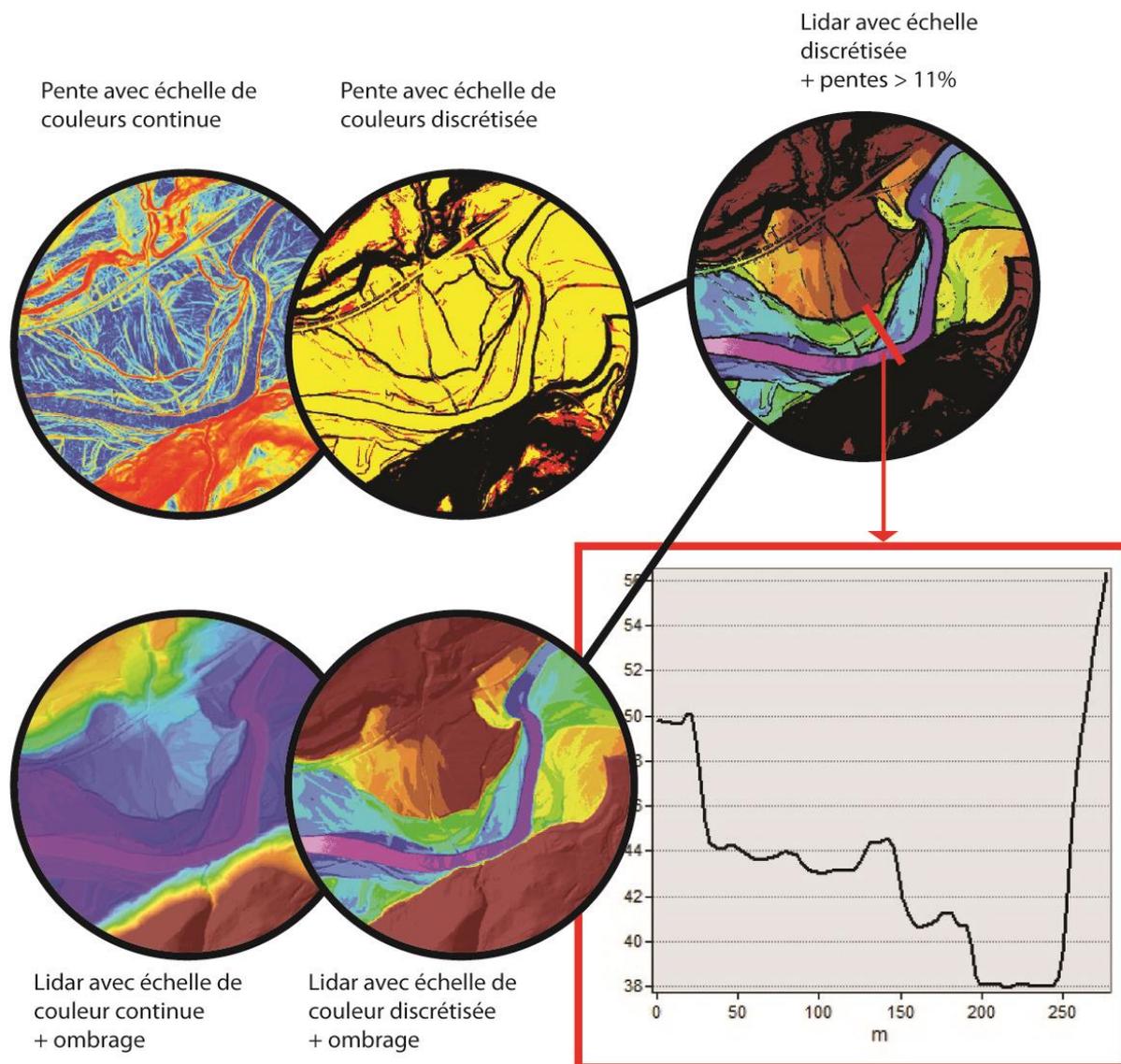


Figure 56 : Les différentes visualisations du LiDAR

Dans le cas des MNT LiDAR qui ont une résolution d'un mètre, nous avons choisi de les rééchantillonner. La résolution de travail est de 3 m. Cette baisse de la résolution permet une meilleure manipulation des données et de réduire la taille des fichiers. La diminution de la résolution ne change pas la qualité des rendus pour une échelle au 1/25000° (Figure 57) qui constitue par exemple l'échelle des cartes de la « Directive Inondation ».

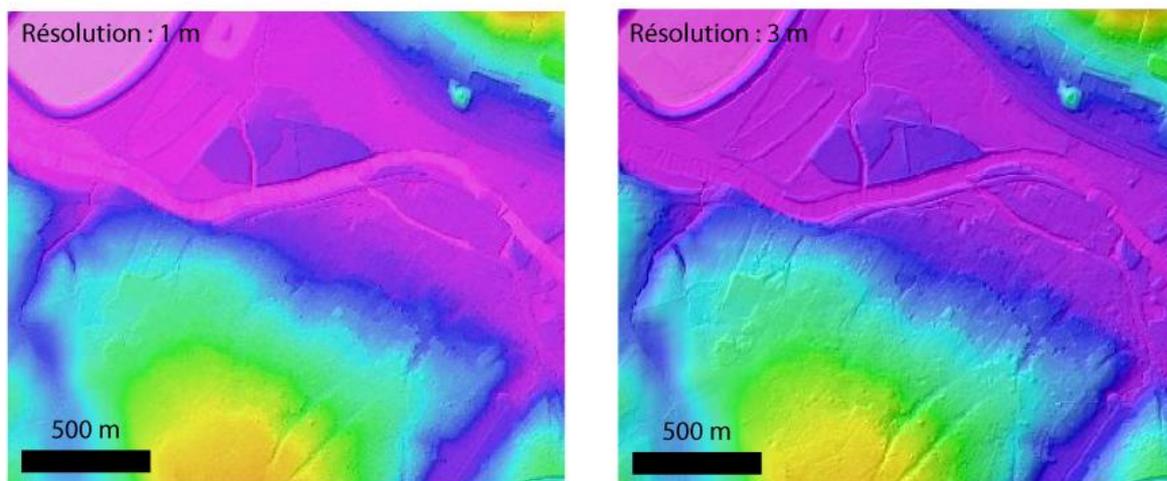


Figure 57 : Comparaison entre le LiDAR de 1 m et de 3 m de résolution à l'échelle 1/25000°

L'utilisation de la donnée LiDAR apporte un changement fondamental par rapport à la photo-interprétation. Auparavant, la réflexion autour du caractère inondable ou non d'une surface était réalisée par le biais d'observations d'altitudes relatives. Aujourd'hui grâce au LiDAR, les différences d'altitude deviennent facilement quantifiables. Il est ainsi possible d'associer une cote aux formes observées. Ce changement constitue un pas supplémentaire vers le dialogue entre géomorphologues et hydrauliciens à travers le « langage » de la cote.

Cependant, l'analyse de la topographie ne suffit pas pour bien appréhender la cartographie des zones inondables. En complément du LiDAR, la superposition d'orthophotographies apporte des éléments sur l'occupation du sol. Enfin les expertises de terrain constituent l'occasion de valider les limites de zones inondables et d'effectuer d'éventuelles modifications.

Les visites de terrain permettent également d'anticiper les étapes suivantes de la réalisation du MNZI. Le géomorphologue est ainsi plus à même d'évaluer si les hauteurs d'eau représentées sont cohérentes avec les indicateurs morphodynamiques observés. Par exemple, dans le lit moyen, des hauteurs d'eau supérieures à 2 m sont a priori cohérentes pour une crue extrême. En revanche, la représentation de plus de 2 m d'eau dans les parties externes du lit majeur demande à être justifiée, par exemple par un secteur de gorges.

3.1.1.3 Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers

L'analyse des discontinuités débute en réalité dès la phase de cartographie hydrogéomorphologique. L'utilisation du MNT LiDAR dans un logiciel de SIG facilite l'accès à des informations relevant de la géométrie de la plaine alluviale. Avant les visites de terrain, les informations indispensables à connaître sont en particulier les variations du profil en long (Figure 58), de la largeur de la zone inondable, ainsi que la présence d'affluents importants.

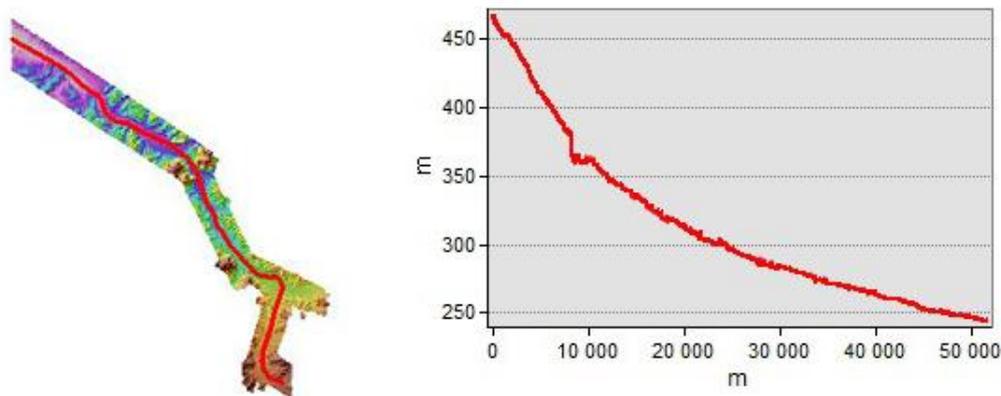


Figure 58 : Profil en long du secteur amont de la Meurthe

Le placement des profils en travers doit permettre de représenter efficacement les variations de la géométrie de la plaine. Mais il ne faut pas omettre que ceux-ci servent par la suite à réaliser un MNLE par le biais d'une interpolation. En conséquence, l'extension latérale des profils ne doit pas s'arrêter aux limites de la zone inondable, mais doivent s'étendre de manière plus large (Figure 59). La largeur d'un profil doit demeurer supérieure à la distance qui le sépare des profils en amont et en aval. Dans le cas contraire, l'interpolation de la ligne d'eau pour les points situés à mi-chemin de deux profils peut être faussée. De plus, les profils en travers doivent être positionnés de manière perpendiculaire à l'écoulement. Cela permet de représenter le plus fidèlement possible l'évolution de la cote de crue vers l'aval.

L'espacement entre deux profils n'est pas homogène. On considère qu'entre deux profils l'hydrodynamisme du cours d'eau est identique, c'est un tronçon homogène. Dans les secteurs sans changements significatifs de l'écoulement, les profils sont plus espacés (> 1 km). Tandis que dans les secteurs plus complexes (traversées urbaines, confluences) l'espacement entre profils se réduit entre 100 m et 200 m.

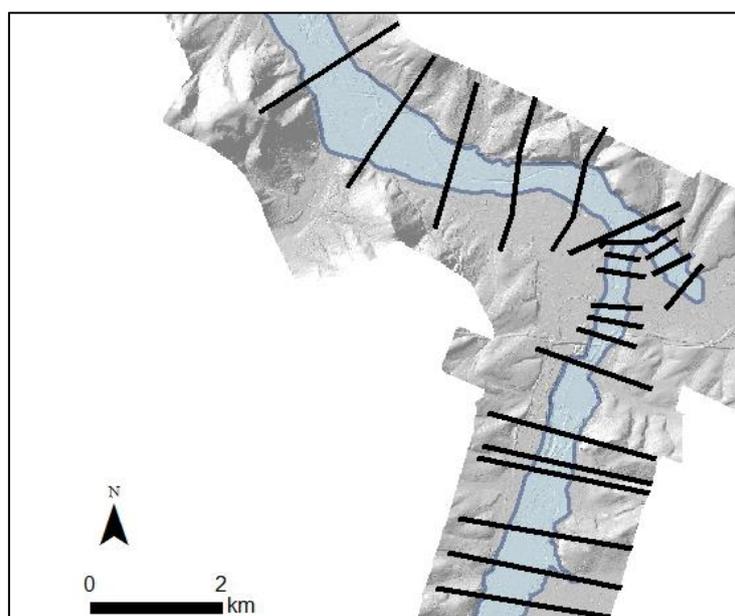


Figure 59 : Positionnement de profils en travers sur la Meurthe

3.1.1.4 Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle

La détermination des cotes de crue par profil est l'étape clé de la réalisation d'un MNZI. Dans un premier temps nous étudions un à un des profils en travers. Pour chacun des profils nous notons une cote minimale et une cote maximale. La cote minimale correspond à la limite en dessous de laquelle l'inondabilité par une crue extrême ne fait aucun doute. Au contraire, au-delà de la cote maximale, l'interprétation du LiDAR et du terrain nous indique que nous ne sommes pas en zone inondable. Nous notons également une cote intermédiaire, qui sera réexaminée suite à la réalisation de sections de contrôle.

Après avoir positionné les profils en travers, nous choisissons certains d'entre eux pour être des sections de contrôle (Figure 60). Dans nos secteurs d'étude nous plaçons une section de contrôle à intervalle de 10 km. Pour un linéaire d'étude de 30 km, il y a donc 4 sections de contrôle. Notons que chaque section de contrôle est également un profil en travers standard qui participera au MNZI.

Le choix de la cote finale est le résultat d'une combinaison de plusieurs opérations : la réalisation de sections de contrôle et la mise en cohérence amont/aval entre les cotes. Chacune des sections de contrôle est saisie dans une feuille de calcul qui utilise la relation Manning-Strickler. En plus de la topographie, la feuille de calcul nécessite d'autres variables telles que la rugosité des deux rives et du chenal (coefficient de Strickler), la pente générale du cours d'eau, ainsi que la distinction entre le lit majeur et le chenal. Le premier objectif des sections de contrôle demeure d'éviter l'attribution d'une cote « improbable » à un profil. Pour cela, il est nécessaire de comparer les débits obtenus par la relation Manning-Strickler et des débits de référence disponibles sur le cours d'eau. Comme le rappelle Sylvain Chave (2003), les débits estimés par la relation Manning-Strickler présentent beaucoup d'inconstances. Mais surtout, ils ne permettent pas d'établir de véritable relation entre les profils en amont et en aval. C'est pourquoi dans le cadre de la réalisation d'un MNZI c'est l'expertise hydrogéomorphologique qui prime. L'hydraulique demeure un complément utile à l'interprétation hydrogéomorphologique.

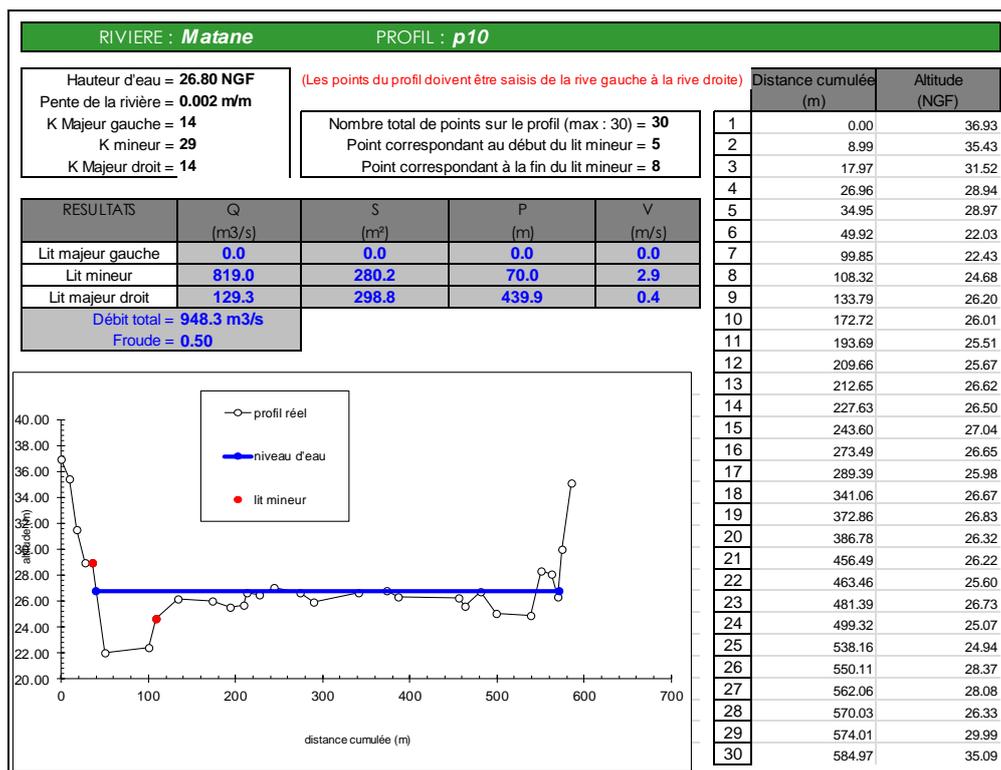
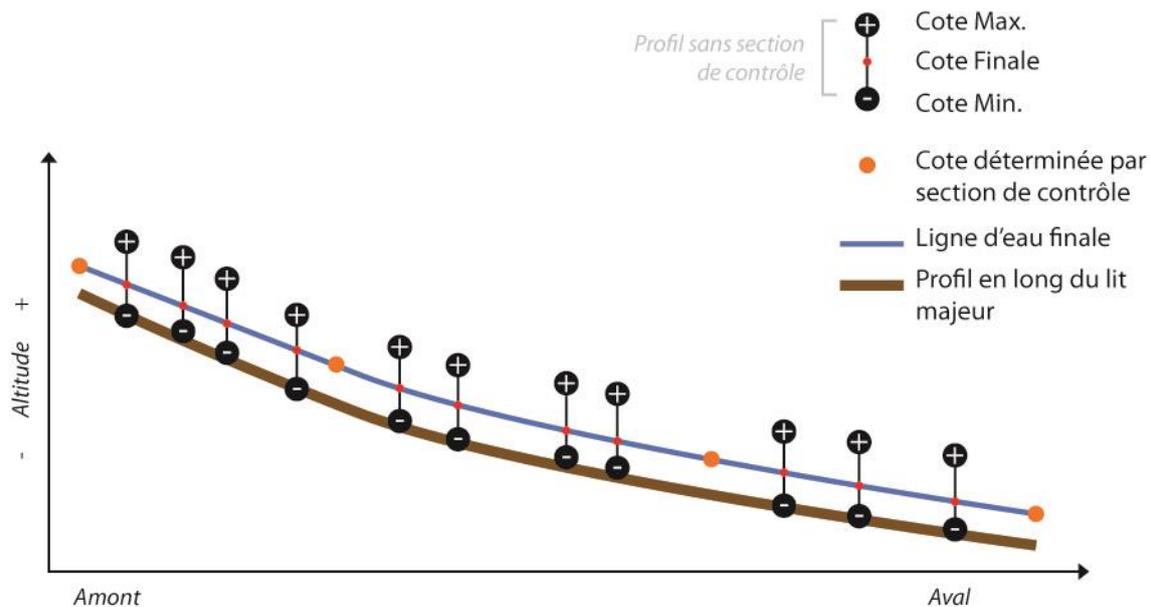


Figure 60 : Exemple d'une section de contrôle de la rivière Matane

La validation des cotes au niveau des sections de contrôle permet d'encadrer la détermination des cotes pour les autres profils en travers. A la suite de cette étape, nous disposons de profils en travers sous forme de polygones. Chaque polygone comporte dans ses données attributaires une cote de crue qui correspond à la limite externe du lit majeur. Les cotes finales des profils sans section de contrôle sont en cohérence avec les cotes des sections de contrôle (Figure 61).



A. Montane, 2013

Figure 61 : Vue longitudinale schématique des sections de contrôle et des profils en travers du MNZI

3.1.1.5 Création d'un MNLE

Le MNLE correspond à la cote de la crue remplissant entièrement le lit majeur. D'un point de vue pratique cette information se présente sous la forme d'un fichier raster où chaque cellule correspond à la cote de la crue hydrogéomorphologique.

La précision des MNT LiDAR permet de se focaliser sur la réalisation du MNLE, au cœur de la mise en place d'un MNZI. En effet, dans le passé les données topographiques pouvaient produire différentes versions de MNT en fonction des interpolations et des paramètres choisis. Or, les MNT LiDAR présentent le grand intérêt de s'apparenter, après validation par le géomètre, à une représentation quasi-objective de la réalité. Les incertitudes altimétriques restent tout de même de l'ordre de 15 cm (Hodgson *et al.*, 2005) et le filtrage de la végétation produit également du bruitage.

Avant de réaliser l'interpolation entre les profils qui donnera le MNLE, il est nécessaire de transformer les polygones en points (Figure 62). En effet, l'interpolation entre des polygones n'est pas satisfaisante, puisqu'elle ne produit pas une ligne d'eau parfaitement rectiligne. Cette opération est réalisée grâce à l'extension «ET GeoWizards⁶⁹» qui s'intègre dans le logiciel Arcmap. L'interpolation est réalisée grâce à la fonction «Topo to raster». Cette fonction est destinée à produire des MNT hydrologiquement corrects. Elle repose sur le programme ANUDEM développé par Michael Hutchinson (Hutchinson et Dowling, 1991; Hutchinson *et al.*, 2011). Bien que cette fonction ne soit pas prévue pour ce type d'opération, elle donne des résultats conformes pour la suite de la méthodologie. L'espacement choisi entre chaque point le long des profils est de 3 m.

⁶⁹ <http://www.ian-ko.com/>

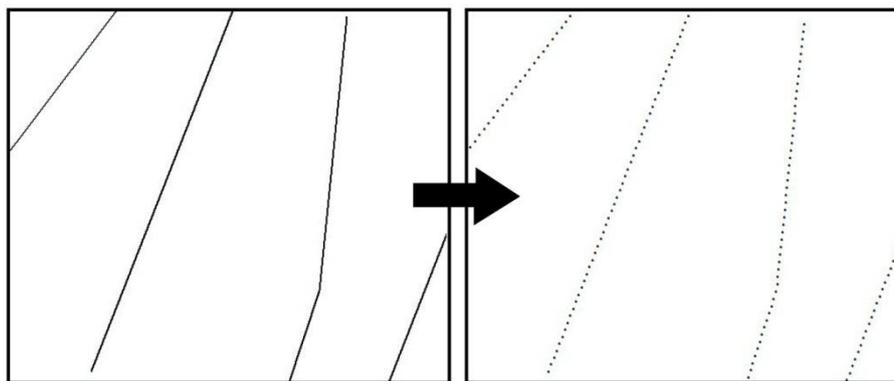


Figure 62 : Conversion des profils polygones en points

L'interpolation entre les profils, sous forme de points, produit le MNLE (Figure 63). Le MNLE se matérialise par une diminution progressive de la ligne d'eau vers l'aval. Pour une meilleure cohérence avec le MNT, la résolution choisie pour le MNLE est la même.

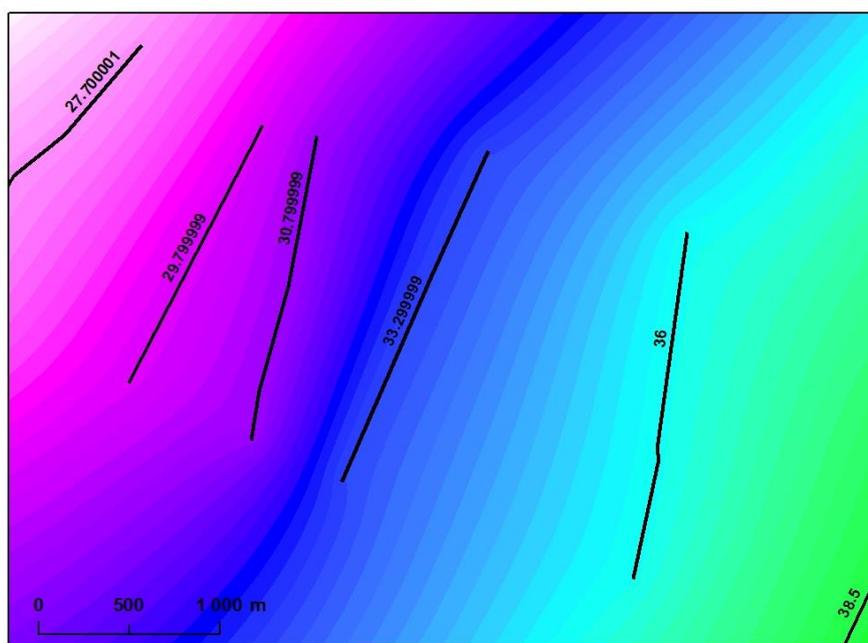


Figure 63 : Le MNLE et les profils associés

3.1.1.6 Création d'un MNZI

La soustraction entre le MNLE et le MNT produit un fichier raster de la même extension que le MNT. Ce fichier raster contient des valeurs positives et négatives (Figure 64). Les valeurs positives correspondent à l'extension du MNZI, tandis que les valeurs négatives sont situées hors zone inondable, dans des secteurs où le MNT est supérieur au MNLE.

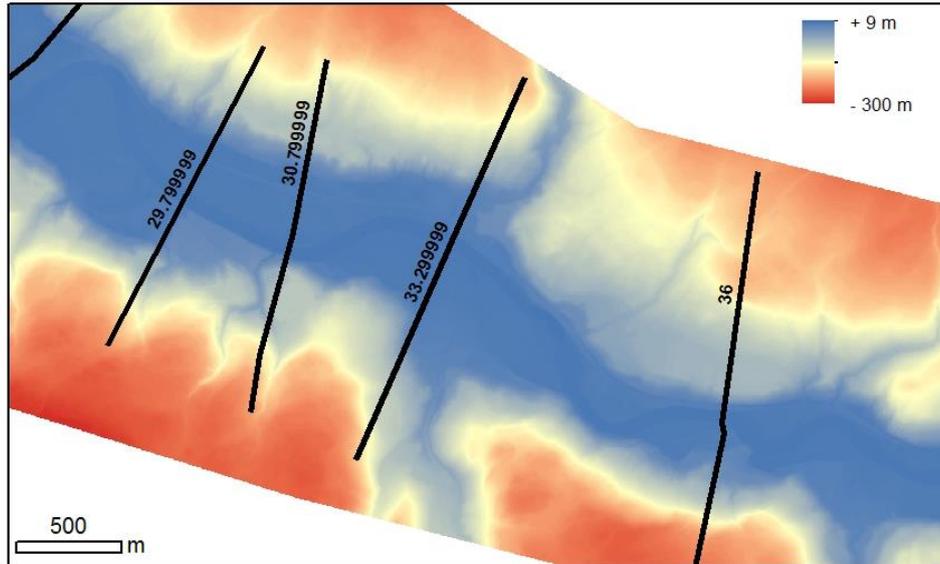


Figure 64 : MNZI « brut » (Source LiDAR : MSP)

A partir du MNZI « brut », l'extraction des valeurs positives du fichier raster produit un MNZI qui présente une échelle de couleurs continue (Figure 65).

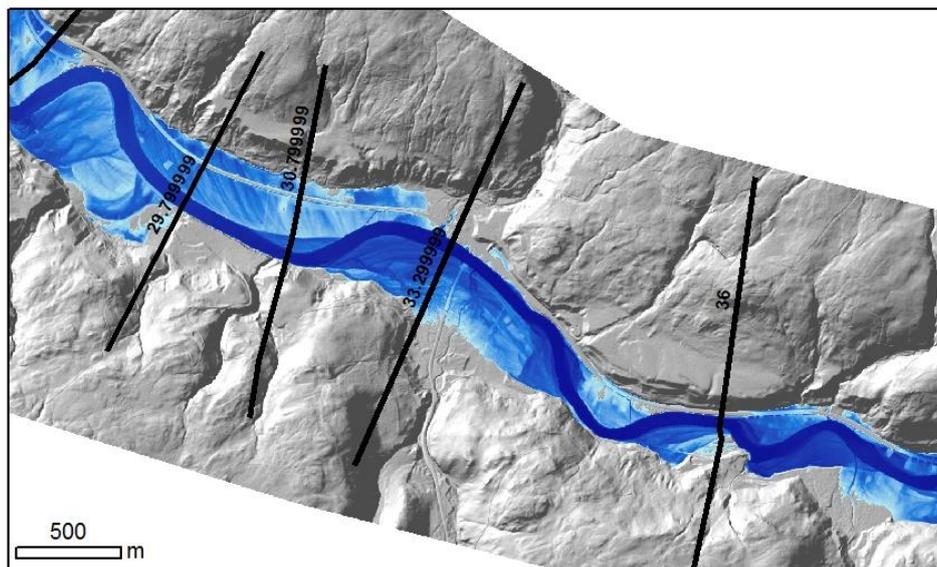


Figure 65 : MNZI raster avec une échelle de couleurs continue (Source LiDAR : MSP)

L'échelle de couleurs continue pour le raster permet de mettre en avant les nuances de hauteurs d'eau que l'on peut représenter. Cependant, au même titre que le MNT LiDAR, la visualisation d'une échelle continue rend la lecture de l'information géographique compliquée. Il est indispensable de discrétiser l'information contenue dans le MNZI (Figure 66). Celle-ci peut ensuite être employée pour représenter la crue extrême de la « Directive Inondation » ou pour être intégrée dans une cartographie de l'aléa d'un PPRI.

La discrétisation choisie varie légèrement d'un site à l'autre. Les deux premiers MNZI réalisés sur l'Argens et le Gardon d'Alès présentent trois classes : 0 à 1 m ; 1 à 2 m et supérieur à 2 m. En raison du cahier des charges de la DREAL Lorraine pour la réalisation des cartes d'aléa nous avons ajouté un nouveau seuil (0 à 0,5 m et 0,5 à 1 m).

Le faisceau laser d'un LiDAR ne peut pas traverser l'eau. En conséquence un MNT LiDAR présente une surface plane et légèrement bruitée pour les zones en eau. Le niveau de ces zones ne correspond en rien à la bathymétrie. Les hauteurs d'eau d'un MNZI sont donc sous évaluées pour les surfaces en eau tels que les lits mineurs. Cependant ce décalage avec la réalité n'entraîne pas de changements pour la cartographie finale du MNZI (discrétisé). En effet, les hauteurs d'eau dans les lits mineurs restent supérieures à 2 m. Il n'y a donc pas de modification dans la représentation des hauteurs d'eau. De plus, dans le cadre de la réalisation du MNZI, la représentation de l'aléa inondation ne constitue pas une fin en soi. Le MNZI a pour objectif de servir la gestion du risque inondation. Or, le lit mineur est un espace d'intérêt insignifiant en ce qui concerne le risque d'inondation.

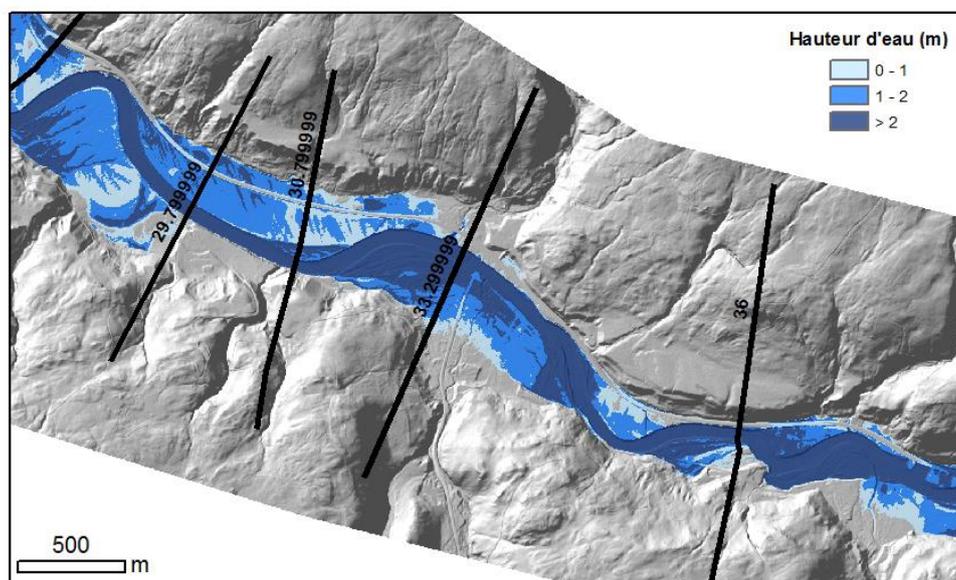


Figure 66 : MNZI discrétisé (Source LiDAR : MSP)

Enfin, pour que le MNZI soit diffusé plus aisément il demeure nécessaire de le transformer en fichier vectoriel, sous forme de polygones. Cette opération menée grâce à l'outil de conversion d'Arcmap entraîne une simplification de l'information (Figure 67)

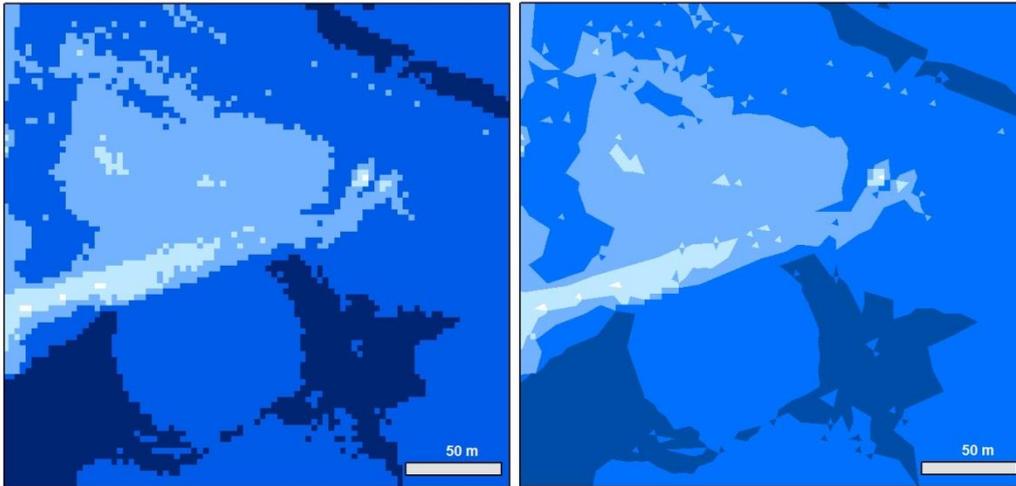


Figure 67 : MNZI raster et MNZI vectorisé

3.1.2 La « Directive Inondation » : valorisation immédiate du MNZI ?

La directive 2007/60/CE, dite « Directive Inondation », relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, donne un « cadre pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, qui vise à réduire les conséquences négatives pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique associées aux inondations dans la Communauté. »

Le décret publié au JO le 3 mars 2011⁷⁰ permet la transposition de la « Directive Inondation » dans le droit français. Il s'appuie également sur les dispositions législatives présentées par la loi du 12 juillet 2010⁷¹. Cette directive prend son impulsion avec les nombreuses inondations qui ont touché les pays membres de l'UE de 1998 à 2002, notamment celles de l'Europe centrale en août 2002.

L'application de la « Directive Inondation » se compose de trois phases : la phase d'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI), la phase de cartographie des risques et des aléas, et la phase de réalisation des Plans de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI). Les trois phases doivent être terminées à l'échéance des 22 décembre 2011, 2013 et 2015.

La phase de l'EPRI vise à caractériser sur l'ensemble du territoire national le risque potentiel d'inondation en croisant les données d'aléa et d'enjeux disponibles. L'identification des Territoires à Risque Important d'inondation (TRI) permet par la suite d'y appliquer les deux phases suivantes de la Directive. Ces TRI correspondent aux parties des grandes agglomérations concernées par le risque d'inondation (Figure 68).

⁷⁰ [Décret n° 2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. JORF n°0052 du 3 mars 2011.](#)

⁷¹ [LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement](#)

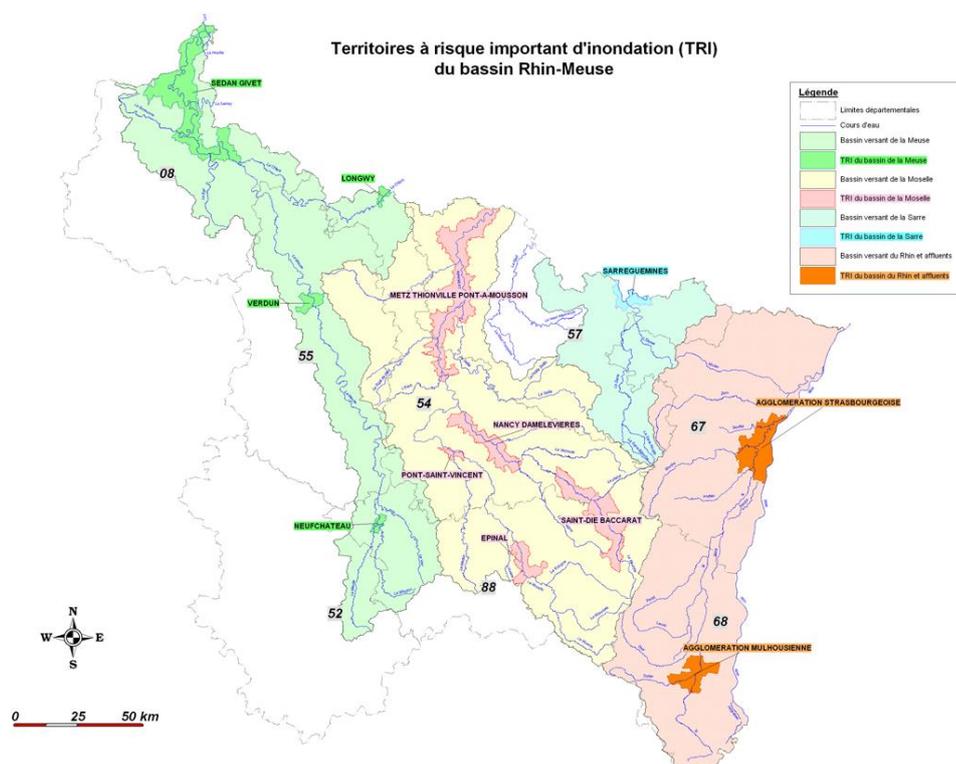


Figure 68 : Les 12 territoires à risque important d’inondation du bassin Rhin-Meuse (Source : DREAL Lorraine)

Après avoir déterminé les TRI, les DREAL ont la charge de produire la cartographie des aléas et des risques. La « Directive Inondation » retient trois types de scénarios de crue pour l’aléa d’inondation par débordement de cours d’eau. Les caractéristiques de chacun des scénarios de crue sont précisées par une circulaire⁷². Le premier scénario est la « crue de forte probabilité » d’une période de retour de 10 ans, puis la « crue de probabilité moyenne » équivalente ou supérieure à une crue centennale. Enfin la « crue de faible probabilité » est définie comme équivalente à une crue millénale ou à la limite du lit majeur hydrogéomorphologique.

Le développement des PPRI se caractérise par l’avènement de la crue centennale comme aléa de référence en France (Le Bourhis et Bayet, 2002; Vinet, 2010). La « Directive Inondation » impose d’élargir la prise en compte des aléas à la crue extrême. Il est légitime de se demander dans quelle mesure l’hydrogéomorphologie peut participer à l’établissement de ces nouvelles références.

3.2 Sites d’étude

Six MNZI ont été réalisés : quatre en France et deux au Québec. Le choix des sites est fortement influencé par la disponibilité des MNT LiDAR, fournies en France par le MEDDE (Ministère de l’Ecologie, du Développement Durable et de l’Energie) et au Québec par le MSP (Ministère de la

⁷² MEDDE, 2012. Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l’évaluation et à la gestion des risques d’inondation (No. DEVP1228419C). Texte non paru du Journal Officiel. 40 p.

Sécurité Publique). Les quatre sites retenus en France sont le Gardon d'Alès, l'Argens et deux portions de la Meurthe (Figure 69). Au Québec, les MNZI sont réalisés sur la rivière Matane et la rivière Richelieu (Figure 70).



Figure 69 : Localisation des sites d'étude en France

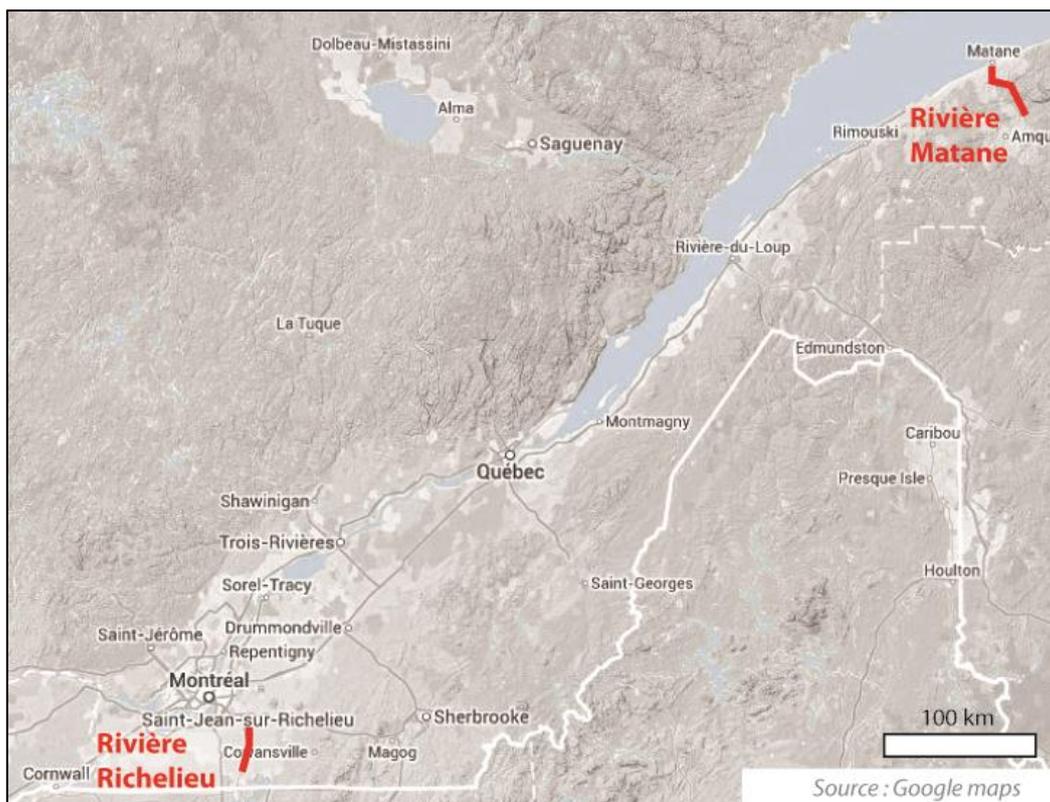


Figure 70 : Localisation des sites d'étude au Québec

3.2.1 Gardon d'Alès

Le secteur d'étude du Gardon d'Alès débute dans la traversée urbaine d'Alès et se termine 2 km en amont de la confluence avec le Gardon d'Anduze (Figure 71). Il comprend également les parties aval de deux affluents : l'Avène en rive gauche et l'Alzon en rive droite. Le linéaire total est de 15 km. Le bassin versant du Gardon d'Alès couvre une superficie de 445 km² environ. La partie amont du bassin versant est comprise dans le massif des Cévennes et notre site d'étude débute directement dans la zone de piedmont au Sud du massif.

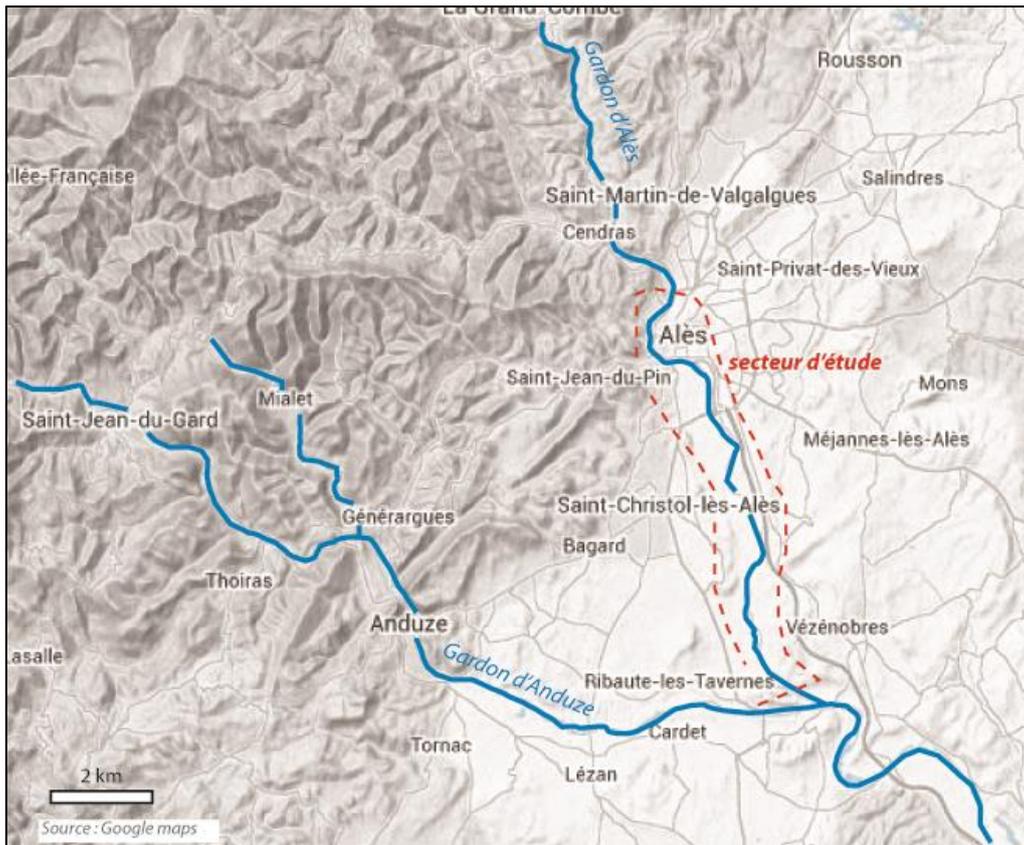


Figure 71 : Localisation du secteur du Gardon d'Alès

La crue historique de référence sur le secteur est la crue des 8 et 9 septembre 2002. Ces crues qui touchèrent l'ensemble des cours d'eau du Gard marquèrent les esprits par leur rapidité et leur caractère torrentiel. Cet événement, qui causa la mort de 23 personnes dans l'ensemble du département est notamment pris en compte pour l'élaboration du PPRI du Gardon d'Alès, approuvé en 2010 (DDTM 30, 2010).

Le MNZI est mené sur le Gardon d'Alès dans le cadre d'un rapport méthodologique produit pour le compte de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques). Ce rapport a pour objectif d'évaluer l'utilisation de données LiDAR pour la cartographie hydrogéomorphologique et pour la réalisation de MNZI (Montané *et al.*, 2012).

Les données MNT disponibles sont constituées de fichiers points XYZ avec une résolution minimale de 30 m issus de relevés LiDAR. La résolution est plus élevée au niveau des ruptures de pente telles que les talus ou les remblais d'infrastructures (Figure 72). Ce type de données constitue une ancienne génération de données topographiques qui représentent un temps de traitement et un poids supérieurs aux actuels fichiers au format ASCII. De plus, les fichiers XYZ nécessitent une interpolation afin d'obtenir un MNT raster.



Figure 72 : Semis de points du LiDAR utilisé pour le Gardon d'Alès

3.2.2 Argens

L'Argens est un fleuve côtier qui se jette dans la mer Méditerranée après s'être écoulé sur un linéaire de 114 km dans le département du Var. Le bassin versant mesure 2600 km². Le risque inondation sur ce cours d'eau a été mis en lumière par les événements de juin 2010. Ils concernent principalement son affluent de rive gauche, la Nartuby, ainsi que la basse vallée de l'Argens de Roquebrune-sur-Argens à Fréjus (Collombat, 2012; Martin, 2010). Les inondations du 15 juin 2010 ont entraîné la mort de 26 personnes et furent un déclic pour cette région où la conscience du risque inondation demeurait basse.

Le linéaire d'étude est de 7 km, essentiellement sur la commune de Vidauban (Figure 73). Tout comme pour le Gardon d'Alès, le MNZI est réalisé dans le cadre du rapport remis à la DGPR. Le choix de l'Argens est motivé par la disponibilité de données LiDAR et par les inondations de 2010 qui apportent une plus-value au projet.

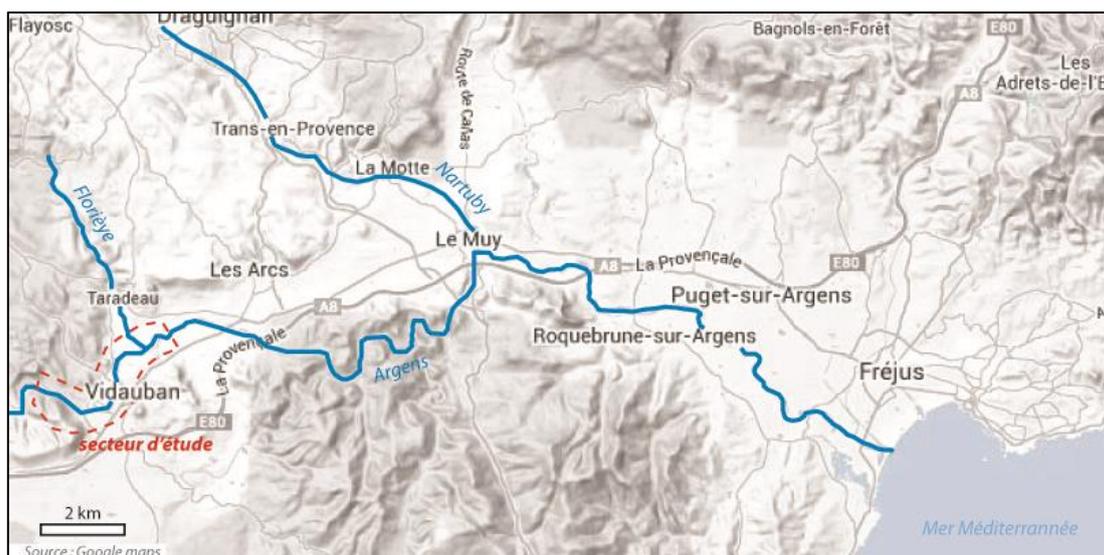


Figure 73 : Localisation du secteur d'étude de l'Argens

Les données MNT disponibles sont des fichiers LiDAR en format ASCII. La résolution du MNT est de 1 m. Les fichiers issus de la base RGE (Référentiel à Grande Echelle) Alti de l'IGN se présentent sous la forme de dalles de 1 km² (Figure 74). Cette donnée a pour objectif de fournir un MNT avec une précision altimétrique de 20 à 30 cm⁷³.

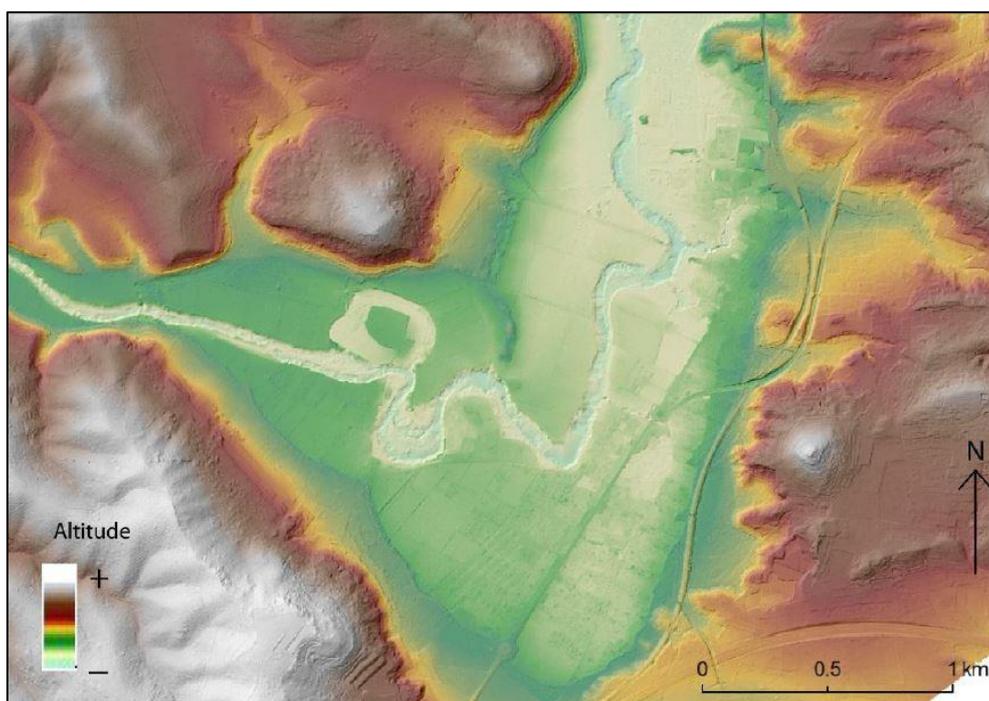


Figure 74 : MNT LiDAR de l'Argens (Source : BD alti, IGN)

⁷³ <http://professionnels.ign.fr/rgealti>

3.2.3 Meurthe amont et aval

La Meurthe est un cours d'un linéaire de 160 km qui prend sa source dans le massif des Vosges, avant de confluer avec la Moselle en aval de Nancy. Son bassin versant, de près de 3000 km², est composé dans sa partie amont des reliefs escarpés des Vosges et dans sa partie aval du plateau lorrain.

Les quatre derniers jours de l'année 1947 furent le théâtre de l'évènement de référence en Lorraine (Nicod, 1949). Cette crue sert à la définition des aléas pour le PSS de la Meurthe (1954) et le PPRI de la Meurthe à Nancy⁷⁴. Les dégâts causés par la Meurthe sont conséquents. On dénombra 18 000 sinistrés et 2 000 bâtiments endommagés à Nancy (Lang *et al.*, 2013).

Deux MNZI sont réalisés sur la Meurthe. Le premier MNZI réalisé concerne l'emprise du TRI de Nancy/Damelevières. Celui-ci est entrepris dans le cadre du rapport remis à la DGPR en 2012. Puis, dans le cadre de la réalisation de la phase de cartographie de la « Directive Inondation », la DREAL souhaite utiliser les résultats du MNZI pour la représentation de la crue extrême. En complément du travail sur le premier TRI nous réalisons un deuxième MNZI sur le TRI de Saint-Dié-des-Vosges/Baccarat. Cette étude fait l'objet d'une commande de la part de la DREAL Lorraine à BURGEAP.

Le secteur d'étude de la Meurthe amont mesure 50 km. Il concerne principalement les villes de Saint-Dié-des-Vosges, Baccarat et Raon-l'Etape. Le secteur aval s'étend sur 30 km et traverse l'agglomération de Nancy ainsi que d'autres villes telles que Damelevières (Figure 75).

Les données topographiques fournies sont du même type que pour l'Argens. Elles correspondent à un extrait de la base RGE alti. Il s'agit de données MNT LiDAR d'une résolution de 1 m.

⁷⁴ DDT de Meurthe-et-Moselle, 2012. Plan de prévention des risques d'inondation. Rivière Meurthe. Communes de Jarville-la-Malgrange, Malzéville, Maxéville, Nancy, Tomblaine et Saint-Max. Rapport de présentation. 55 p.

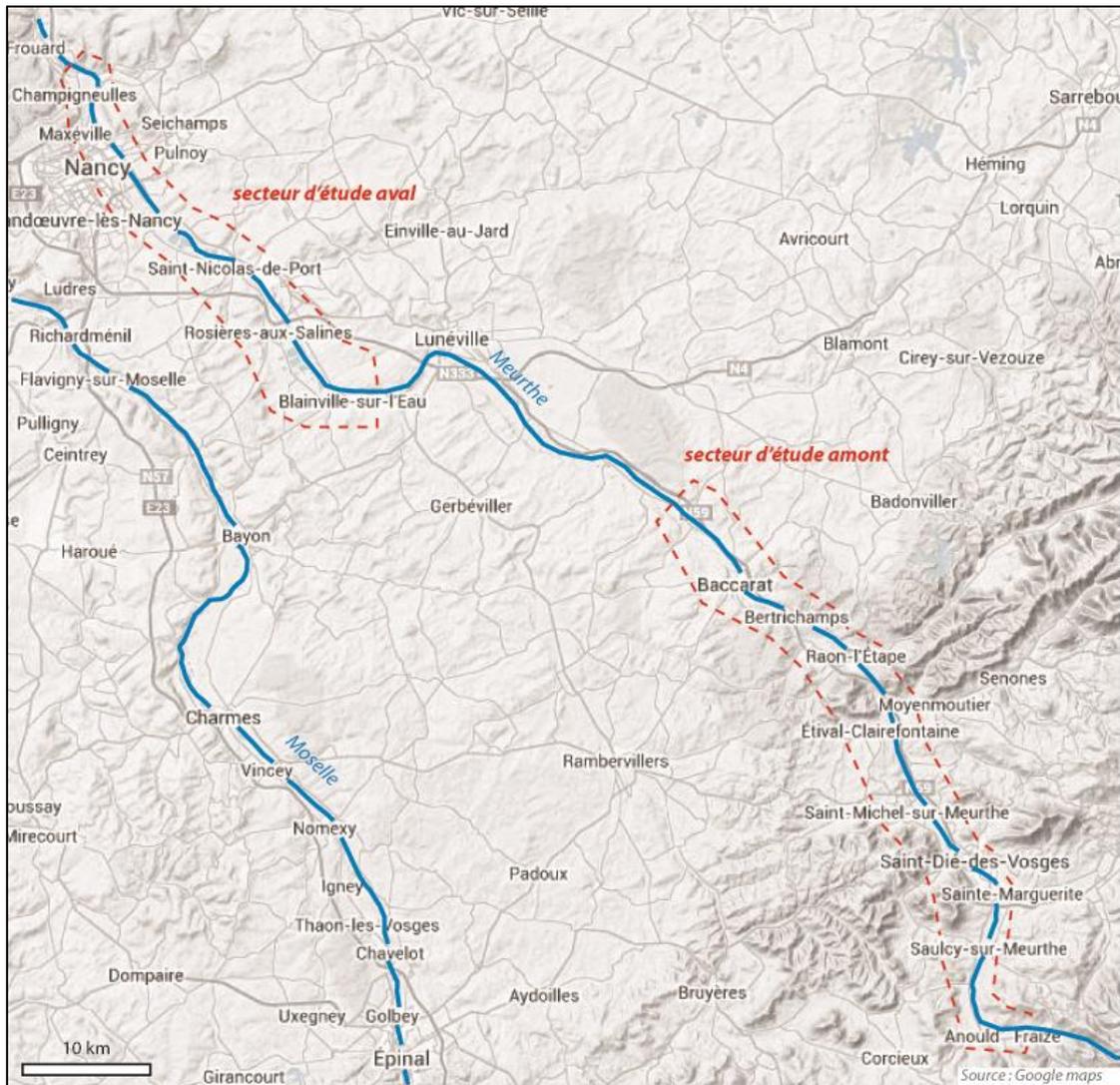


Figure 75 : Localisation des secteurs d'étude de la Meurthe

3.2.4 Matane

La rivière Matane s'écoule sur un linéaire de 80 km vers le nord-ouest au sein de la péninsule gaspésienne. Elle prend sa source dans la réserve faunique de Matane et se jette dans le fleuve Saint-Laurent après avoir traversé la ville côtière de Matane. Le relief du bassin versant de la Matane correspond à l'orogénèse appalachienne. Elle est caractérisée par des formations sédimentaires fortement plissées et faillées qui produisent un relief escarpé (Demers *et al.*, 2014).

Une particularité de la rivière Matane mérite d'y prêter attention : la glacio-isostasie. La plaine alluviale des cours d'eau étudiés en France s'est construite après la remontée du niveau marin issue de la fonte des calottes glaciaires. Or, au Québec, les cours d'eau construisent leur plaine alluviale depuis le retrait de l'inlandsis laurentidien. Le retrait des glaces entraîne un rebond isostatique qui entraîne une baisse du niveau marin relatif (Dionne, 1988). La plaine alluviale de Matane s'est donc construite durant l'Holocène par incision dans des terrasses fluvio-glaciaires (Demers *et al.*, 2014; Marchand *et*

al., 2013a). Les unités de la plaine alluviale active se retrouvent en perpétuelle évolution. Certaines portions de lits majeurs les plus anciens peuvent être considérées comme en cours de fossilisation, du fait de la remontée de la roche-mère. Cette particularité est prise en compte par la cartographie hydrogéomorphologique réalisée par le laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR, dans le cadre d'un rapport remis au MSP (Olsen *et al.*, 2011).

Le secteur étudié de la rivière Matane s'étend sur 36 km depuis le resserrement rocheux, 4 km en aval de la confluence avec la rivière Tamagodi, jusqu'à l'embouchure dans le fleuve Saint-Laurent (Figure 76). Les principaux enjeux se situent dans la ville de Matane, ainsi que dans la municipalité de Saint-René-de-Matane.

Le MNT employé pour la réalisation du MNZI est issu de levés LiDAR aéroportés. Il propose une résolution de 1 m et se présente sous la forme d'un raster ArcGIS. La rivière Matane est choisie en raison de la disponibilité de la donnée LiDAR et de la réalisation contemporaines d'études portant sur la cartographie hydrogéomorphologique.

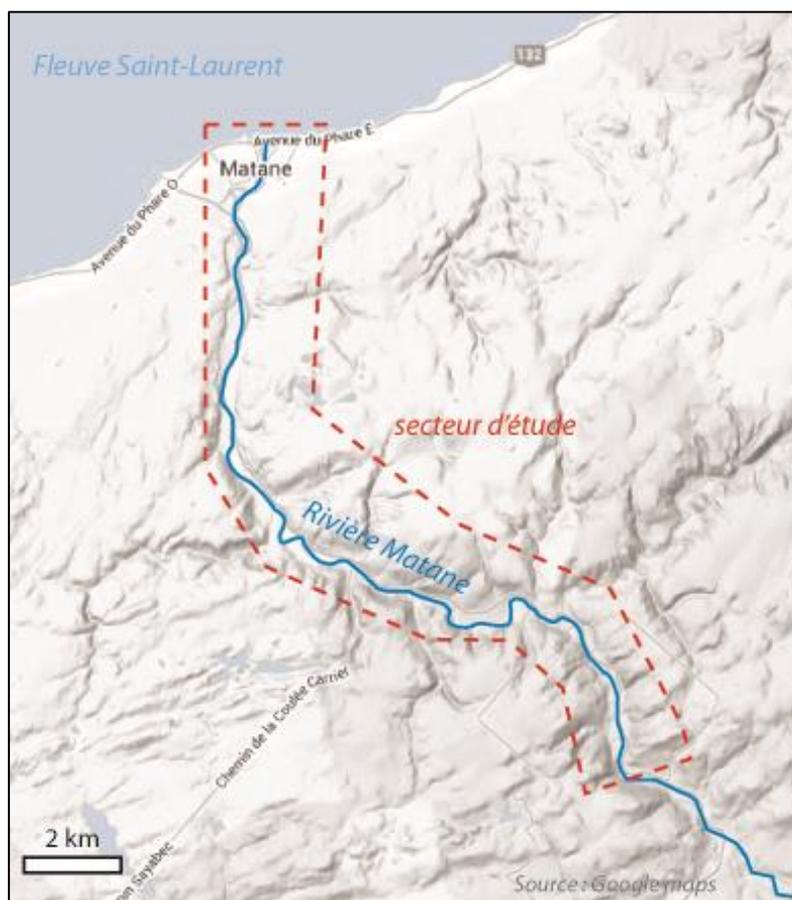


Figure 76 : Localisation du secteur d'étude de la rivière Matane

3.2.5 Rivière Richelieu

La rivière Richelieu est un cours d'eau émissaire du Lac Champlain (1269 km²) qui conflue avec le fleuve Saint-Laurent après avoir parcouru un linéaire de près de 124 km. Son bassin versant s'étend sur plus de 24 000 km² puisqu'il comprend les sous bassins versants des cours d'eau qui descendent des massifs des Adirondacks et des Montagnes Vertes, situés aux États-Unis. Si la portion étatsunienne du bassin versant comporte des reliefs marqués, la rivière Richelieu s'écoule au sein des sédiments marins issus de la mer de Champlain (Occhiatti et Richard, 2003; Parent et Occhiatti, 1988).

Le linéaire étudié mesure 23 km (Figure 77). Il s'étend de l'Ile-aux-Noix jusqu'à la traversée urbaine de Saint-Jean-sur-Richelieu. Le choix de ce secteur d'étude est motivé par plusieurs éléments. Tout d'abord, la crue du printemps 2011 qui inonda près de 3000 habitations sur une période de 2 mois⁷⁵ nous donne la possibilité de comparer l'extension de la crue avec celle d'une cartographie hydrogéomorphologique. Ensuite, le caractère lent des inondations nous offre l'opportunité d'évaluer la pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique pour ce type de cours d'eau.

Les données topographiques disponibles sont un MNT LiDAR en format XYZ. La densité des points est au minimum d'un point tous les 3 mètres et descend à 1 point par mètre dans les ruptures de pente. Le MNT raster produit a une résolution de 3 m.

⁷⁵ Gouvernement du Canada, 2011. Environnement Canada - Conditions atmosphériques et météorologie - Inondations du Richelieu: la plus longue catastrophe au Québec. <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=D7CF8BE3-1>

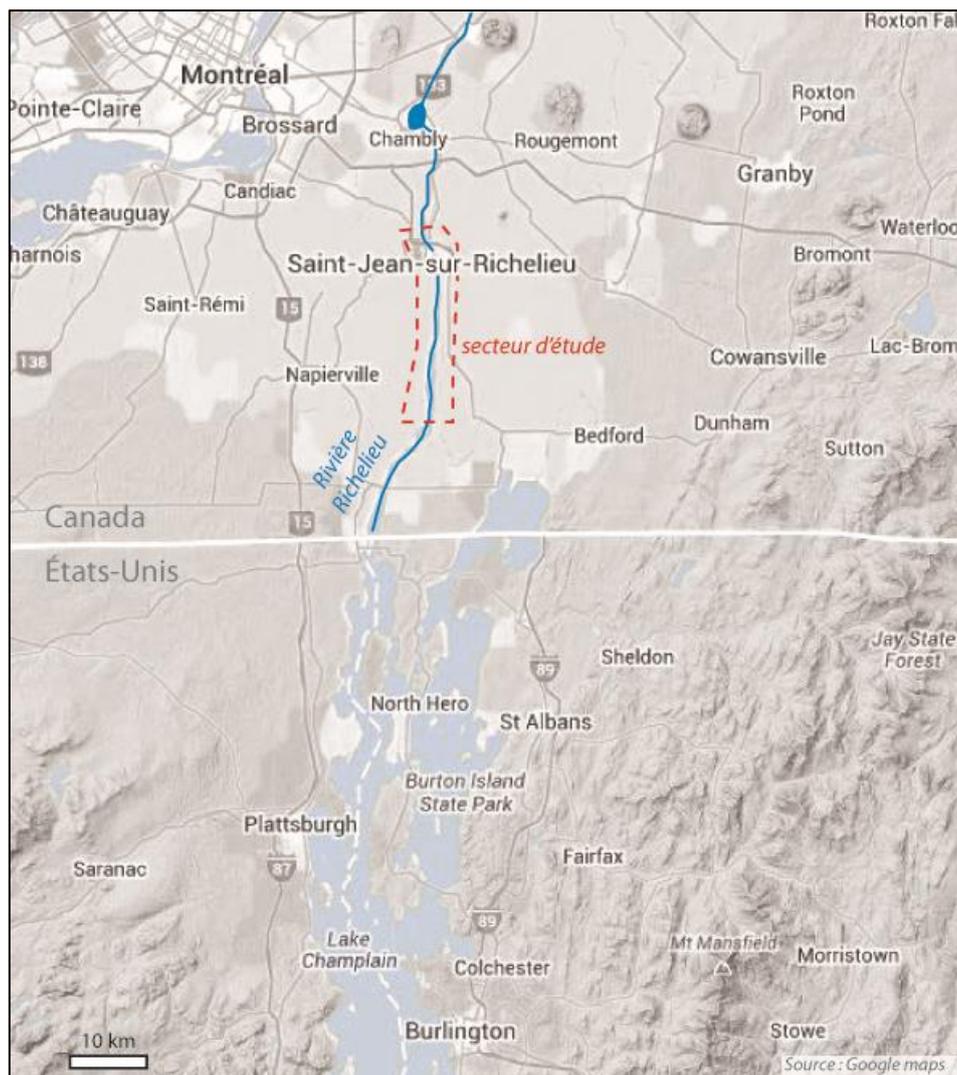


Figure 77 : Localisation du secteur d'étude de la rivière Richelieu

3.3 Réalisation de MNZI

A travers l'exemple de six sites d'étude, nous proposons de détailler les particularités méthodologiques de ceux-ci, ainsi que décrire les principaux résultats issus de la réalisation de MNZI.

3.3.1 Gardon d'Alès

3.3.1.1 Cartographie hydrogéomorphologique

Le Gardon d'Alès possède déjà un AZI hydrogéomorphologique. Notre secteur d'étude fait partie du linéaire traité dans le cadre de l'AZI du bassin versant des Gardon (DIREN Languedoc-Roussillon, 2003). Ce cours d'eau se situe au cœur du développement de la cartographie hydrogéomorphologique en France (Ballais, 2006). Ce cours d'eau ne présente pas de difficulté particulière pour délimiter les

zones inondables. La lithologie résistante et l'énergie importante du cours d'eau, issue en particulier de sa situation de piedmont produisent des limites de zone inondables bien nettes.

Bien que la cartographie soit disponible, nous réalisons une délimitation des zones inondables grâce à l'interprétation du LiDAR. La comparaison entre la cartographie réalisée sur fond LiDAR et celle de l'AZI ne montre pas de différences significatives (Figure 78). Les seules différences sont explicables par des différences de précision. L'interprétation montre peu d'incertitudes, mise à part dans le centre urbain d'Alès, en raison des constructions et du recalibrage du lit mineur. Nous utilisons désormais la cartographie que nous avons produite comme information de référence pour la suite de la réalisation du MNZI.

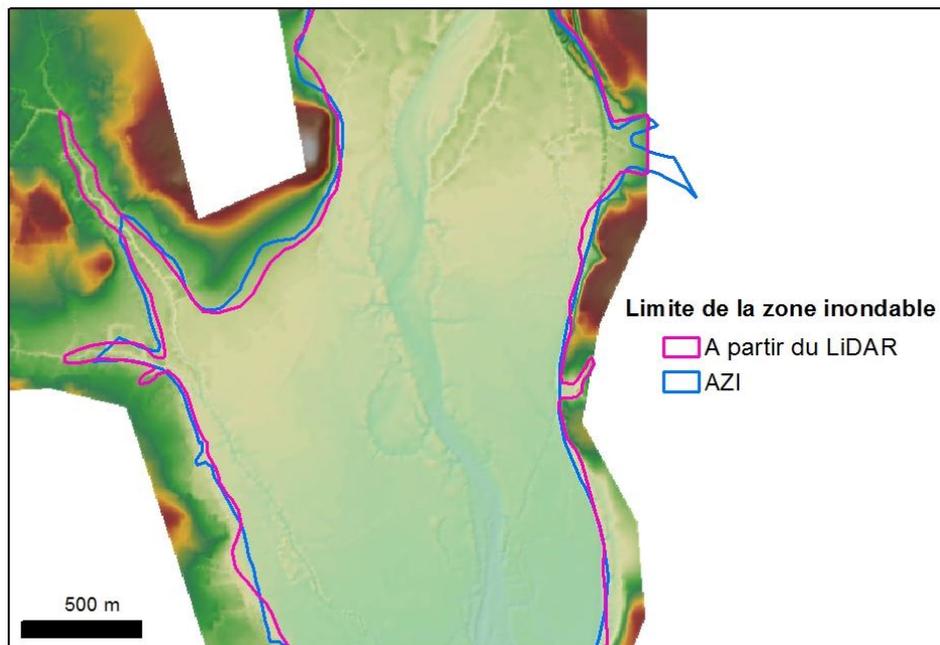


Figure 78 : Comparaison entre l'AZI du Gardon et la cartographie hydrogéomorphologique réalisée à partir du LiDAR

3.3.1.2 Positionnement des profils en travers

Tout comme l'Argens, le Gardon d'Alès ne connaît pas de variation de son profil en long sur notre secteur d'étude. La pente longitudinale du lit majeur est de 3 ‰. La zone inondable est plus étroite à l'amont du secteur d'étude, au niveau de la traversée urbaine d'Alès (250 m) et à l'aval dans le rétrécissement structural qui précède la confluence avec le Gardon d'Anduze (400 m). En revanche toute la partie intermédiaire présente une largeur moyenne de 1200 m. La distance entre les profils est en moyenne de 800 m.

3.3.1.3 Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle du Gardon d'Alès

Pour le Gardon d'Alès, les débits estimés sur les sections de contrôle sont comparés avec les débits de la crue de 2002, sur laquelle repose le PPRI du Gardon d'Alès⁷⁶.

Le rapport du PPRI fait état d'un débit de 2500 à 3300 m³/s pour l'évènement de 2002. Les deux sections de contrôle se situent à dans la portions aval de la section urbaine d'Alès et à l'aval du linéaire étudié. Pour les deux sites, les débits estimés (2800 et 3200 m³/s) se situent dans l'intervalle cité dans le PPRI.

La concordance entre les débits mentionnés dans le PPRI et ceux des sections de contrôle est logique. En effet, tel que signalé dans le rapport du PPRI les espaces du lit majeur du Gardon d'Alès ont été inondés par la crue de 2002 « [...] dans leur intégralité sur une très grande partie du linéaire. ». Cette affirmation est corroborée par des observations similaires réalisées sur le Gardon d'Anduze (Ballais, 2006), qui conflue avec le Gardon d'Alès, quelques km après notre site d'étude.

3.3.1.4 MNZI du Gardon d'Alès

Après avoir produit le MNLE, nous produisons un raster qui correspond à la différence avec le MNT, le MNZI. Sur le Gardon d'Alès celui-ci a une résolution identique à celle du MNT utilisé, à savoir 5 m. Les résultats sur ce cours d'eau présentent deux intérêts. Tout d'abord, il est possible de comparer les hauteurs d'eau associées au MNZI avec une cartographie hydrogéomorphologique. Ensuite, nous pouvons évaluer ce que représente l'emprise du MNZI avec une crue supérieure à la crue centennale, en l'occurrence, la crue millénale modélisée par le bureau d'étude JBA Consulting.

La question de la communication autour des crues extrêmes est un point qui motive le développement de MNZI. En effet, la représentation de formes par un aplat de couleur, tel que le lit majeur en bleu clair s'avère peut représentatif de la nature de l'aléa inondation. La cartographie hydrogéomorphologique représentée avec le découpage en trois lits donne l'impression d'une différenciation de l'aléa entre ces trois unités. Certes, les trois lits présentent des fréquences de submersion graduées (Ballais *et al.*, 2011; Delorme-Laurent, 2007; Masson *et al.*, 1996). Mais, dans le cas d'une crue qui remplit entièrement le lit majeur, cette homogénéité des unités hydrogéomorphologiques n'est plus valable (Figure 79). Le lit majeur est majoritairement constitué de limons de débordement associés à des processus de sédimentation et à des vitesses faibles (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996). Pourtant le MNZI met en avant que des hauteurs d'eau supérieures à deux mètres peuvent survenir en lit majeur. Cette affirmation est confirmée par le PPRI du Gardon d'Alès dont la crue de référence fondée sur l'évènement de 2002 fournit les mêmes limites que le MNZI produit. Les deux cartes présentées ci-dessous peuvent laisser penser que nous avons affaire à deux scénarios de crue d'intensité différente. Or, elles correspondent simplement à deux visions différentes d'une même zone inondable.

⁷⁶ DDTM du Gard, 2010. Plan de Prévention des Risques d'Inondation du Gardon d'Alès. Rapport de présentation. 69 p.

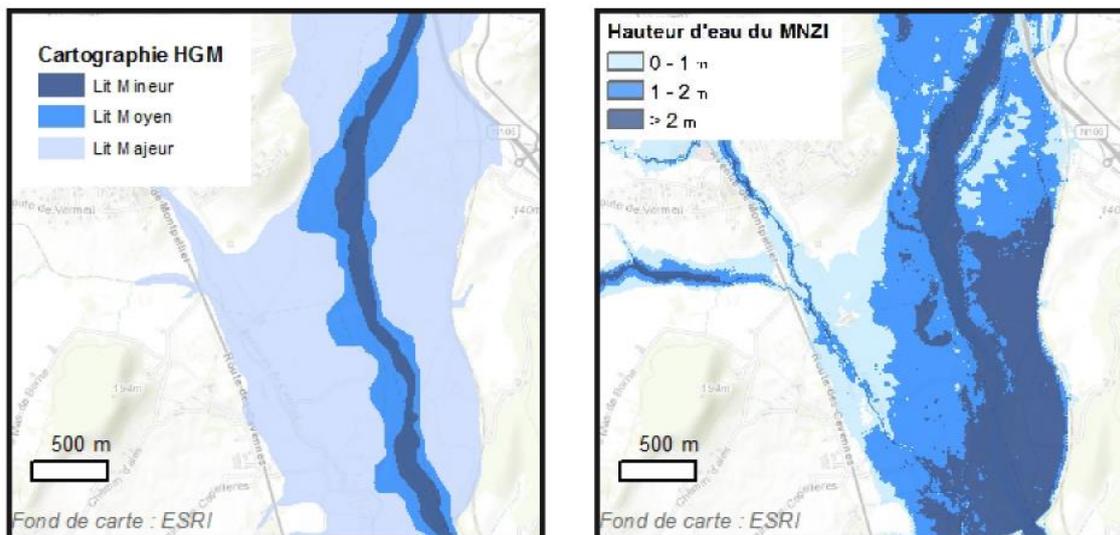


Figure 79 : Comparaison entre la cartographie hydrogéomorphologique et le MNZI du Gardon

En 2012, le bureau d'étude britannique JBA Consulting remet un rapport au MEDDTL, portant sur la réalisation de cartes d'aléa de crues décennales, centennales et millénales (JBA Consulting, 2012). Ces cartes portent sur l'Oise, le Vistre et le Gardon d'Alès. La modélisation des crues prend en compte les données hydrologiques fournies par SHYREG (Lavabre *et al.*, 2003; Organde *et al.*, 2013) et les intègre dans le logiciel Jflow⁷⁷. Ce logiciel de modélisation fournit l'extension de la crue millénales que nous comparons avec le MNZI réalisé (Figure 80).

La comparaison entre les deux types de données apporte un enseignement majeur. Leur extension est similaire. Seules quelques différences résiduelles sont perceptibles, à mettre en relation avec des différences de données topographiques et à la méthodologie différente. Notons par ailleurs que la cartographie réalisée par JBA Consulting ne prend pas en compte les deux affluents du Gardon. Ces écarts ne préfigurent pas de différences significatives, mais sont simplement le résultat du choix de l'emprise du secteur d'étude.

⁷⁷ <http://www.jbaconsulting.com/products/JFlow>

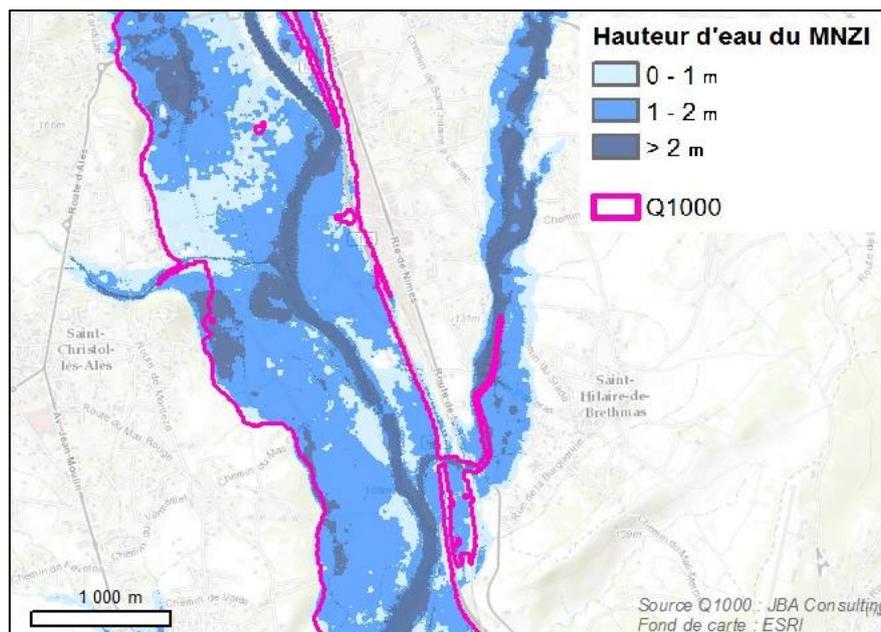


Figure 80 : Comparaison entre le MNZI et la crue millénale de JBA Consulting

3.3.2 Argens

3.3.2.1 Cartographie hydrogéomorphologique

Comme pour le Gardon d’Alès, il existe déjà un AZI hydrogéomorphologique⁷⁸ au moment de l’étude. Cet AZI correspond en général à la cartographie issue de l’interprétation du LiDAR (Figure 81). Il subsiste tout de même quelques écarts imputables à des différences d’interprétation. C’est notamment le cas du lit majeur en rive droite de l’Argens. La limite de l’AZI y est environ 100 m plus large que notre cartographie. La formation en question correspond à un versant légèrement colluvionné. Il peut éventuellement être concerné par du ruissellement. Cependant, compte-tenu de son altitude et des formes observées sur le terrain il semble peu vraisemblable qu’il fasse partie du lit majeur. Nous utilisons la cartographie des zones inondables réalisée grâce à l’interprétation du LiDAR comme information de base pour la suite de l’étude.

⁷⁸ DIREN PACA, 2004. Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables en région PACA. Département du Var. 47 p.

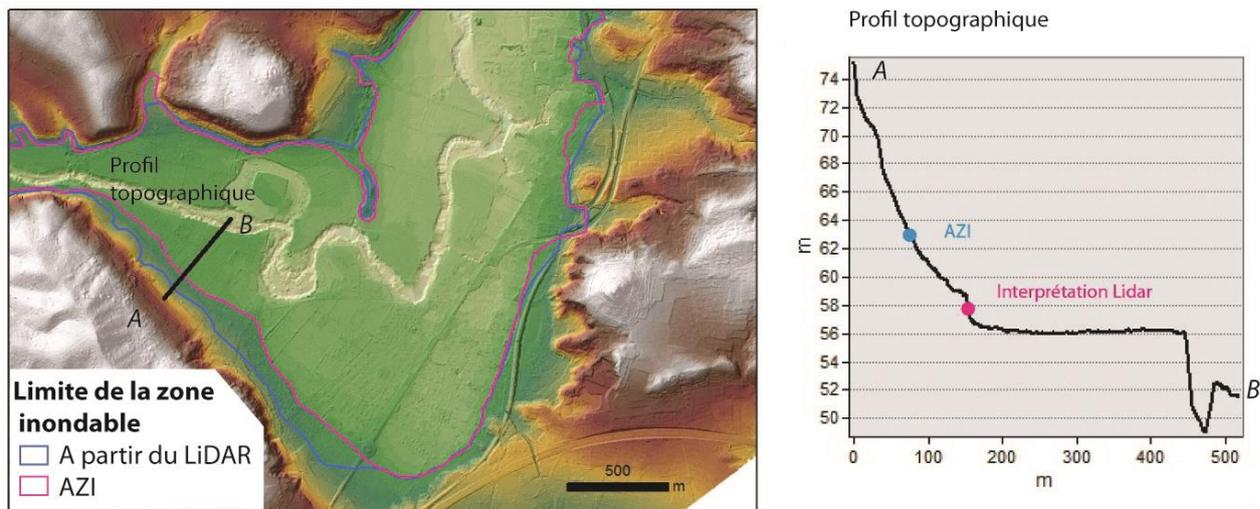


Figure 81 : Comparaison entre l'AZI de l'Argens et la cartographie hydrogéomorphologique réalisée à partir du LiDAR

3.3.2.2 Positionnement des profils en travers

Le profil en long de la plaine alluviale de l'Argens ne montre pas de discontinuités sur le secteur d'étude. La pente générale est de 1,8‰. La largeur de la zone inondable varie de 200 m dans un secteur engorgé en amont, à 900 m au niveau de la traversée urbaine de Vidauban. Au final, ce sont 11 profils qui permettent par la suite de réaliser le MNLE. La distance moyenne entre les profils en travers est de 700 m. Le seul affluent significatif est la Florièye, qui conflue avec l'Argens en rive gauche.

3.3.2.3 Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur l'Argens

Dans le cas de l'Argens, les comparaisons sont effectuées avec la crue de juin 2010. Suite à un retour d'expérience, le débit de l'Argens lors de cet évènement est estimé entre 800 et 1200 m³/s pour la station des Arcs-sur-Argens (Lefort et Koulinski, 2011). Notre site d'étude situé 3 km en amont de cette station hydrométrique n'est pas concerné par la crue extrême de 2010 subie notamment par les communes qui bordent la Nartuby ou la basse plaine de l'Argens. Le débit instantané de la Florièye est estimé entre 380 et 600 m³/s (Lefort et Koulinski, 2011).

Nous prenons en compte deux sections de contrôle. La première est située à l'amont de Vidauban et la deuxième en aval de la Florièye. Les cotes estimées pour la crue extrême correspondent à des débits de 1100m³/s et 1400m³/s. Compte-tenu du caractère non extrême de la crue de 2010 dans notre secteur d'étude, les débits sont cohérents.

A titre de comparaison, nous avons testé les cotes fournies par les limites de la zone inondable de l'AZI de l'Argens (DIREN PACA, 2004) déjà comparées à notre cartographie (Figure 81). Pour la limite de zone inondable fournie par l'AZI, le débit varie de 2000 m³/s à 3500 m³/s. Ces débits

invalident l'inondabilité de ces espaces par l'Argens et montrent l'intérêt de ces sections de contrôle qui, rappelons-le, n'ont pas vocation à remplacer un modèle hydraulique.

3.3.2.4 MNZI de l'Argens

Nous ne disposons pas de cartographie de la crue millénale pour le secteur d'étude de l'Argens. En revanche l'AZI, ainsi que la cartographie de l'aléa inondation réalisé pour le PPRI de l'Argens (Figure 82) permet de donner un point de repère sur le MNZI réalisé (Figure 83).

La carte d'aléa du PPRI de l'Argens est le résultat de la combinaison d'une modélisation hydraulique de la crue de juin 2010 et du complément apporté par l'AZI hydrogéomorphologique. Cette légende est similaire aux pratiques employées dans la région Languedoc-Roussillon (Cf. Chapitre 2). Deux zones se distinguent. Tout d'abord, la moitié amont présentée sur la carte montre que la crue de 2010 n'a pas entièrement rempli le lit majeur. Ce fait s'explique par le caractère non extrême de la crue pour cette portion de bassin versant (Lefort et Koulinski, 2011). En revanche, au droit de la ville de Vidauban, la zone inondée occupe plus des trois quarts de la zone inondable. Par ailleurs, les niveaux d'aléa du PPRI et les classes de hauteurs d'eau du MNZI montrent une bonne correspondance. Par exemple, la zone inondée en rive droite de l'Argens, au Sud de la ville est identifiée dans le MNZI par la classe de hauteur d'eau supérieure à 2 m. Le PPRI, quant à lui, en classe une partie en « aléa très fort ».

Le MNZI produit se trouve dans une position intermédiaire par rapport à l'AZI et à la crue de référence. Il est moins étendu que l'AZI car il ne prend pas en compte les affluents ainsi que les cônes torrentiels. En revanche, il remplit entièrement le lit majeur, ce que ne prend pas en compte la cartographie de la crue de référence (juin 2010).

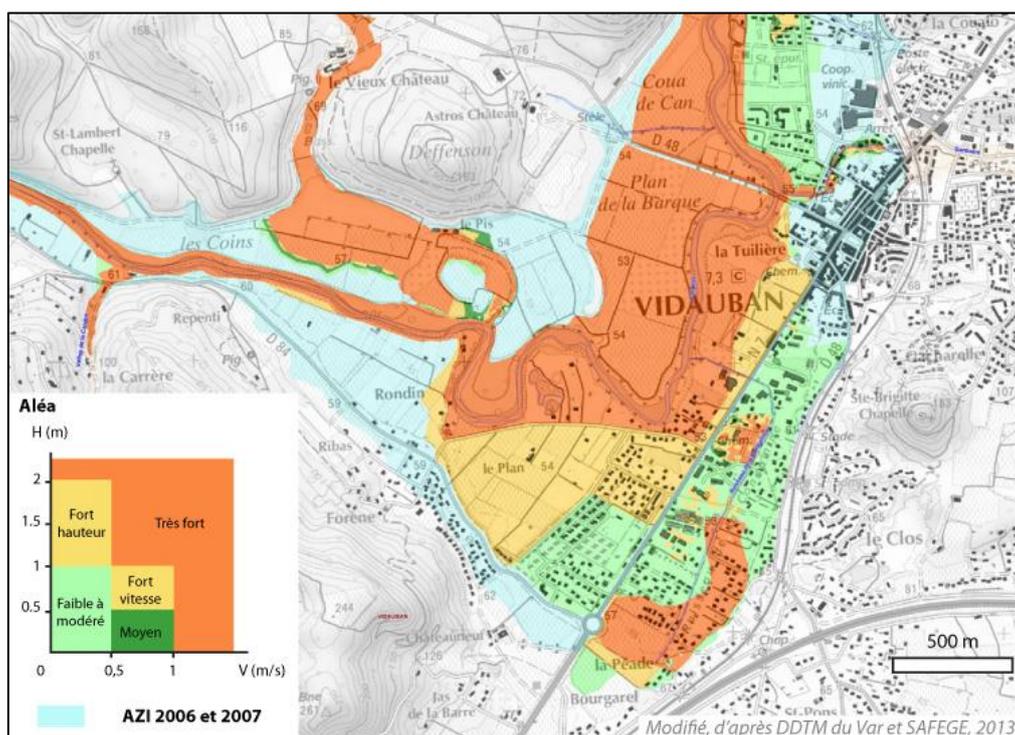


Figure 82 : Cartographie de l'aléa inondation du PPRI de l'Argens, dans le secteur de Vidauban

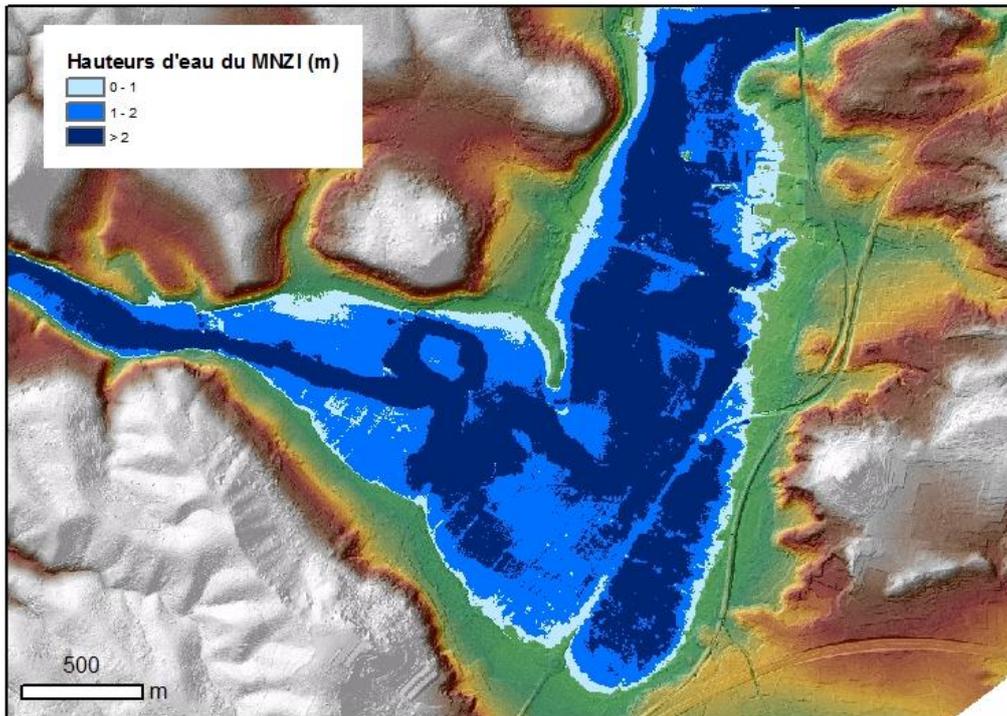


Figure 83 : MNZI de l'Argens, sur le secteur de Vidauban

3.3.3 Meurthe amont

3.3.3.1 Cartographie hydrogéomorphologique

Pour la Meurthe, nous ne disposons pas de cartographie hydrogéomorphologique préexistante. Nous réalisons la cartographie des zones inondables à partir d'un MNT LiDAR. Bien qu'étant de plus faible énergie que l'Argens ou le Gardon d'Alès, les formes des zones inondables sont assez nettes pour être perçue sur le terrain (Photographie 6). La distinction entre l'encaissant et les zones inondables se fait d'autant plus facilement que la majorité des constructions se situe majoritairement hors des zones inondables.



Photographie 6 : Limite de zone inondable sur le secteur de la Meurthe amont. Commune de Flin

3.3.3.2 Positionnement des profils en travers

La Meurthe amont possède un profil en long qui diffère des autres sites d'étude. Depuis l'amont du secteur d'étude jusqu'à Saint-Dié-des-Vosges, la pente de la vallée est de 8,6 ‰. Puis, progressivement le cours d'eau s'extirpe du massif des Vosges pour s'écouler au sein du Plateau Lorrain. La pente est alors de 2 ‰. Durant son parcours, la Meurthe rencontre en rive droite la Fave, le Rabodeau, la rivière de la Plaine ou encore le ruisseau de la Valdange en rive gauche. La largeur de la zone inondable se réduit jusqu'à 100 m dans un secteur de gorges en amont de Raon-l'Etape et s'étend à 1300 m près de Glonville. Ce sont 63 profils répartis sur les 51 km de linéaire qui permettent ensuite de produire le MNLE. Ces profils peuvent être espacés de 150 m dans les portions urbanisées ou près des confluences. Ils restent distancés de 1500 m pour les biefs qui ne présentent pas de modification de la géométrie de la plaine (Figure 84).

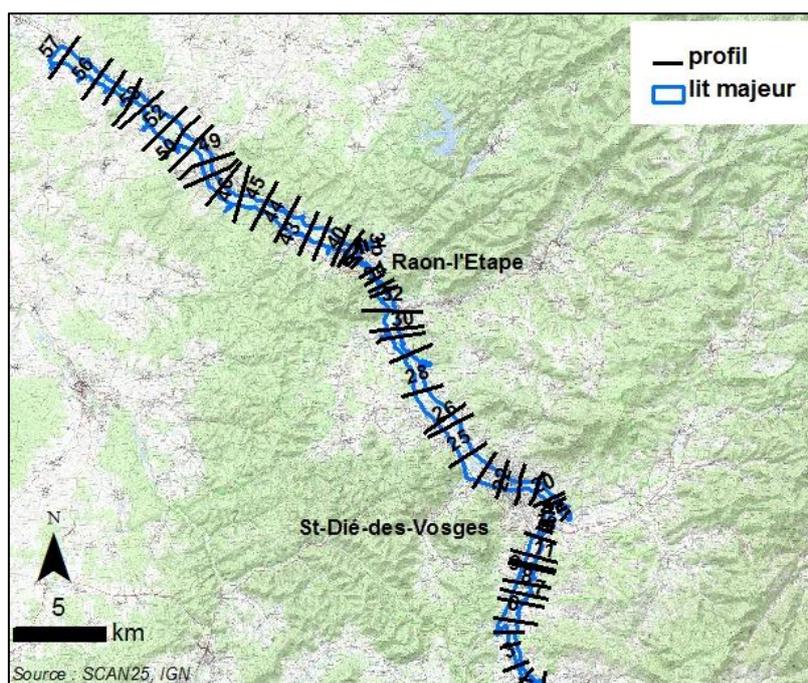


Figure 84 : Localisation des profils en travers pour le secteur amont de la Meurthe

3.3.3.3 Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur la Meurthe amont

Pour le secteur de la Meurthe amont, nous choisissons de comparer les débits de la crue centennale avec ceux obtenus grâce aux sections de contrôle. Les nombreuses estimations de cette crue, rassemblées dans un rapport d'études préliminaires au PAPI de la Meurthe permettent de garder une cohérence dans nos observations (DIREN Lorraine, 2008). Les débits des quatre sections de contrôle pour la Meurthe amont sont présentés dans le Tableau 6. On note que les débits estimés sont supérieurs à la crue centennale, mais restent cohérents.

Localisation section de contrôle	Débit mesuré pour la section de contrôle	Q100 ou crue historique de référence
Anould	290 m ³ /s	ND
St-Michel-sur-Meurthe	470 m ³ /s	Hydratec(1989) estime la Q100 à St-Dié à 188 m ³ /s
Entre Raon-l'Étape et Thiaville-sur-Meurthe	560 m ³ /s	SAFEGE (1997) estime la Q100 en aval de Raon à 410 m ³ /s
Flin	590 m ³ /s	SINBIO (2004) estime la Q100 à Baccarat à 436 m ³ /s

Tableau 6 : Sections de contrôle de la Meurthe amont

3.3.3.4 MNZI de la Meurthe amont

Pour la Meurthe, la crue de référence est celle de 1947. Cependant, pour le secteur amont, nous ne disposons pas d'une cartographie de cette crue. Le PSS de la Meurthe réalisé en 1956 suite aux inondations survenues neuf ans plus tôt permet de combler cette lacune. Ce document présente également une correspondance planimétrique correcte avec le MNZI produit. Cependant, certains secteurs montrent des écarts marqués.

Le PSS se trouve être plus large que le MNZI dans plusieurs secteurs. En plus de ces écarts, un manque de symétrie flagrant est visible entre les deux rives (Figure 85). Sur l'exemple présenté, on observe qu'en rive droite du PSS la limite externe se situe à 257 m NGF, tandis qu'en rive gauche elle se situe à l'altitude de 252 m NGF. Notons que les différences planimétriques proviennent également d'une différence d'interprétation. Pour information, une crue avec une cote de 255 m NGF correspondrait un débit compris entre 2000 et 2500 m³/s. Alors que pour ce tronçon le MNZI correspond à un débit compris entre 500 et 600 m³/s (DIREN Lorraine, 2008).

Deux éléments sont possibles pour expliquer ces erreurs. Elles expriment tout d'abord le peu d'intérêt porté pour la cartographie des « zones de débits complémentaires dans les PSS (Garry *et al.*, 2002). De surcroît, il demeure important de prendre en considération la différence de données topographiques

disponibles. En effet, pour la réalisation du MNZI, nous disposons d'un MNT LiDAR qui présente une précision homogène des zones urbanisées aux zones rurales. En revanche, la réalisation du PSS est caractérisée par l'absence de données topographiques précises. Il reste également à prendre en compte que ces PSS sont largement tributaires de la disponibilité de repères de crue. Or, les zones rurales présentent moins de repères de crue que les zones urbaines.

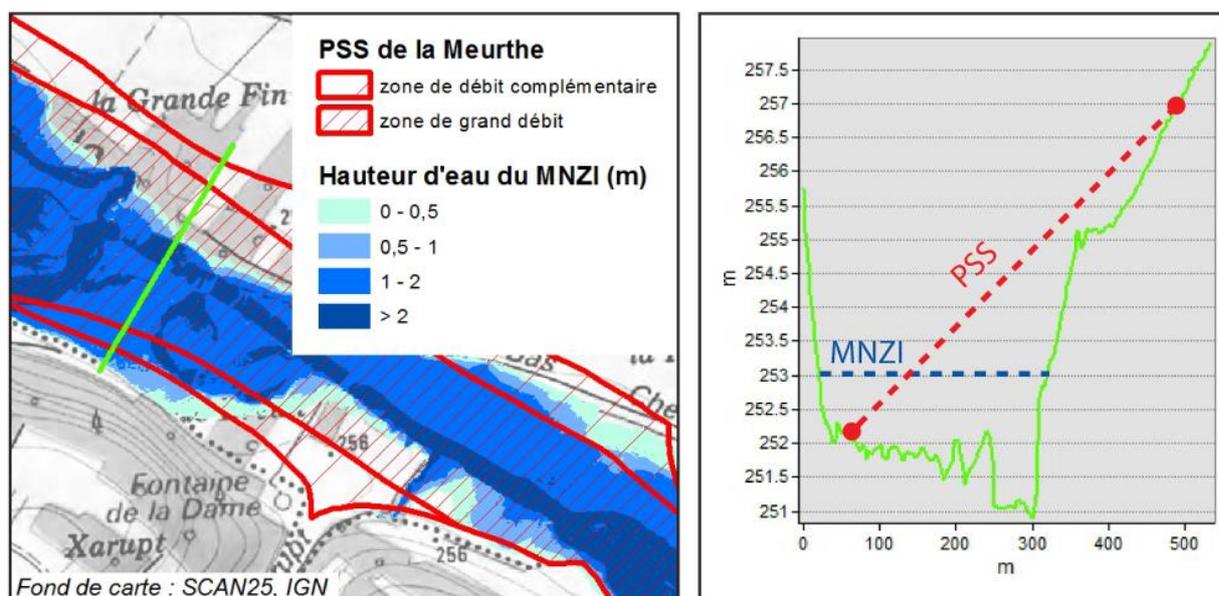


Figure 85 : Le PSS et le MNZI de la Meurthe

Le MNZI réalisé sur la Meurthe amont est donc cohérent du point de vue des observations de terrain, mais il diffère légèrement en question les données disponibles. La précision des données utilisées reste le facteur principal de ces différences.

3.3.4 Meurthe aval

3.3.4.1 Cartographie hydrogéomorphologique

La Meurthe aval présente une énergie plus faible que la Meurthe amont. La présence d'argiles dans la lithologie entraîne par endroit une imprécision de la limite de zone inondable, notamment dans des formations de marnes triassiques⁷⁹. Mise à part ces difficultés ponctuelles, la visibilité du versant reste possible à la fois sur le terrain et sur le LiDAR sans nécessiter une investigation très poussée.

La distinction des zones inondables est parfois impossible suite à des visites de terrain ou à une simple visualisation du MNT LiDAR. Aucune rupture de pente nette n'est visible. Pourtant les formes existent et il est possible de les associer à des processus.

⁷⁹ BRGM, 1978. Carte géologique à 1 / 50 000. Nancy. Notice explicative. 47 p.

L'exemple le plus emblématique de ces difficultés demeure l'élargissement entre Blainville-sur-l'eau et Rosières-aux-Salines, la localisation de la zone inondable se complexifie (Photographie 7). En raison d'un élargissement structural de la vallée, le raccordement entre le versant et le lit majeur s'effectue au moyen de plusieurs glacis d'épandage.



Photographie 7 : Limite de zone inondable peu nette entre un glacis d'épandage et le lit majeur de la Meurthe

Aucune rupture de pente n'est visible et l'identification des zones inondables sur le terrain est difficile. Cette identification est en revanche réalisable en repérant la topographie bombée des glacis (Figure 86). Cela devient également possible en effectuant un recouplement des limites de zones inondables en amont en en aval. L'observation transversale de la plaine alluviale n'est plus suffisante, il faut l'observer de manière longitudinale. La possibilité de visualiser le MNT LiDAR avec une échelle de couleur discrétisée favorise encore plus l'interprétation de la micro-topographie.

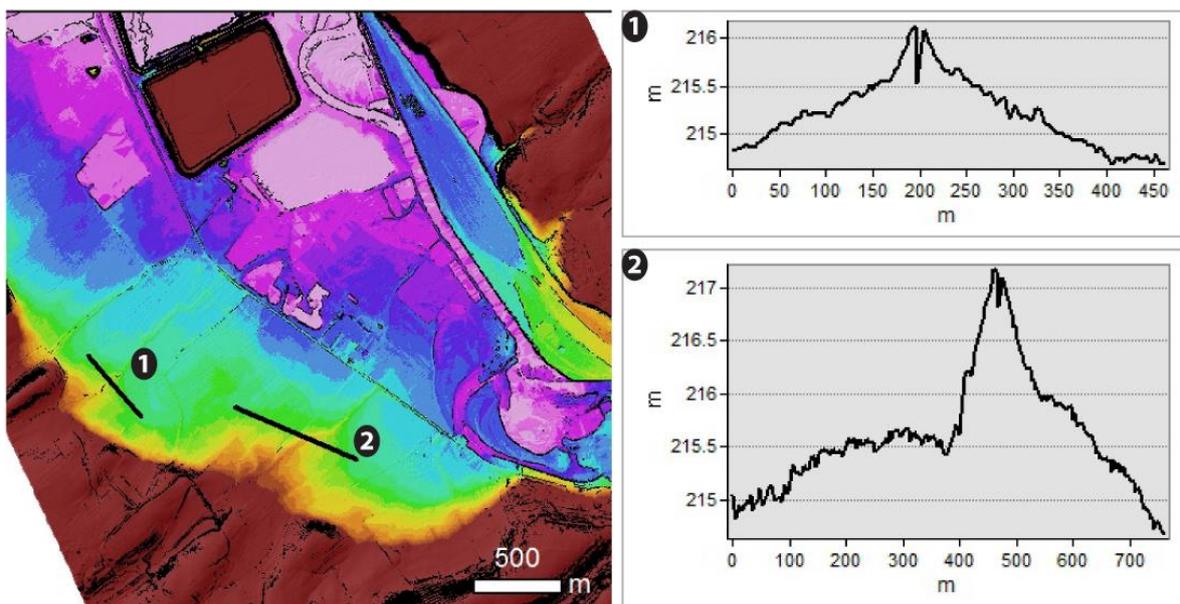


Figure 86 : Repérage des glacis d'épandage grâce à des profils topographiques

Notons que les glacis d'épandage demeurent inondables, mais pour un ruissellement diffus et non par débordement de la Meurthe.

3.3.4.2 Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers

Le profil en long de la Meurthe aval (TRI de Nancy/Damelevières) ne présente pas de rupture. La pente reste constante à 0,8 ‰. Sur le plan visuel, la Meurthe semble ne présenter aucun écoulement et une ligne d'eau quasi-horizontale en raison des nombreux barrages et seuils tout le long du secteur d'étude. La largeur de la zone inondable se limite à 200 m sur la commune de Mont-sur-Meurthe et s'étend à 1800 m près de Rosières-aux-Salines. L'espace moyen entre les profils est de 900 m. Il peut atteindre 3 km dans les secteurs où la zone inondable s'élargit et 300 m pour le secteur de Nancy. 33 profils en travers sont répartis le long de la Meurthe aval.

3.3.4.3 Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur la Meurthe aval

Tout comme pour le secteur amont, la Meurthe aval montre des débits supérieurs à la crue centennale, avec un rapport de 1,3 à 1,5 (Tableau 7). Pour rappel, dans le département du Gard, une doctrine fondée sur les formules de Bressan-Golossof préconise de multiplier la crue centennale par 1,8 pour obtenir une « crue exceptionnelle » (Bressan et Golossof, 1996). Dans le cadre de la cartographie de la crue extrême de la Meurthe, nous nous situons en dessous des débits préconisés dans le Gard.

Localisation section de contrôle	Débit mesuré pour la section de contrôle	Q100 ou crue historique de référence
Damelevières	1000 m ³ /s	DIREN Lorraine (2008) Q100 estimée à Damelevières à 740 m ³ /s
Dombasle-sur-Meurthe	1300 m ³ /s	ND
Nancy	1400 m ³ /s	DIREN Lorraine (2008), la Q100 de la Meurthe est estimée à 910 m ³ /s à

Tableau 7 : Sections de contrôle pour la Meurthe aval

3.3.4.4 MNZI de la Meurthe aval

L'emprise du MNZI produit sur la Meurthe aval correspond aux zones inondables identifiées par l'analyse hydrogéomorphologique. De plus, l'évènement de référence de la Meurthe, la crue de 1947 (Nicod, 1949), possède la même extension que le MNZI (Figure 87a). Des différences locales sont visibles. Elles s'expliquent tout d'abord par la différence de données topographiques disponibles. Ensuite, la topographie a pu évoluer entre 1947 et 2012 (réalisation MNT LiDAR). Cette observation est particulièrement pertinente pour le secteur de Nancy (Figure 87b) où de nombreux remblais en lit majeur sont visibles. En outre, le lit mineur de la Meurthe y est recalibré pour atténuer l'impact de crues futures. L'estimation du débit grâce à la section de contrôle de Nancy, nous indique qu'il nous

faut baisser de 40 cm la cote de crue par rapport à la limite externe du lit majeur. En conséquence, le MNZI y est également légèrement moins large que la crue de 1947.

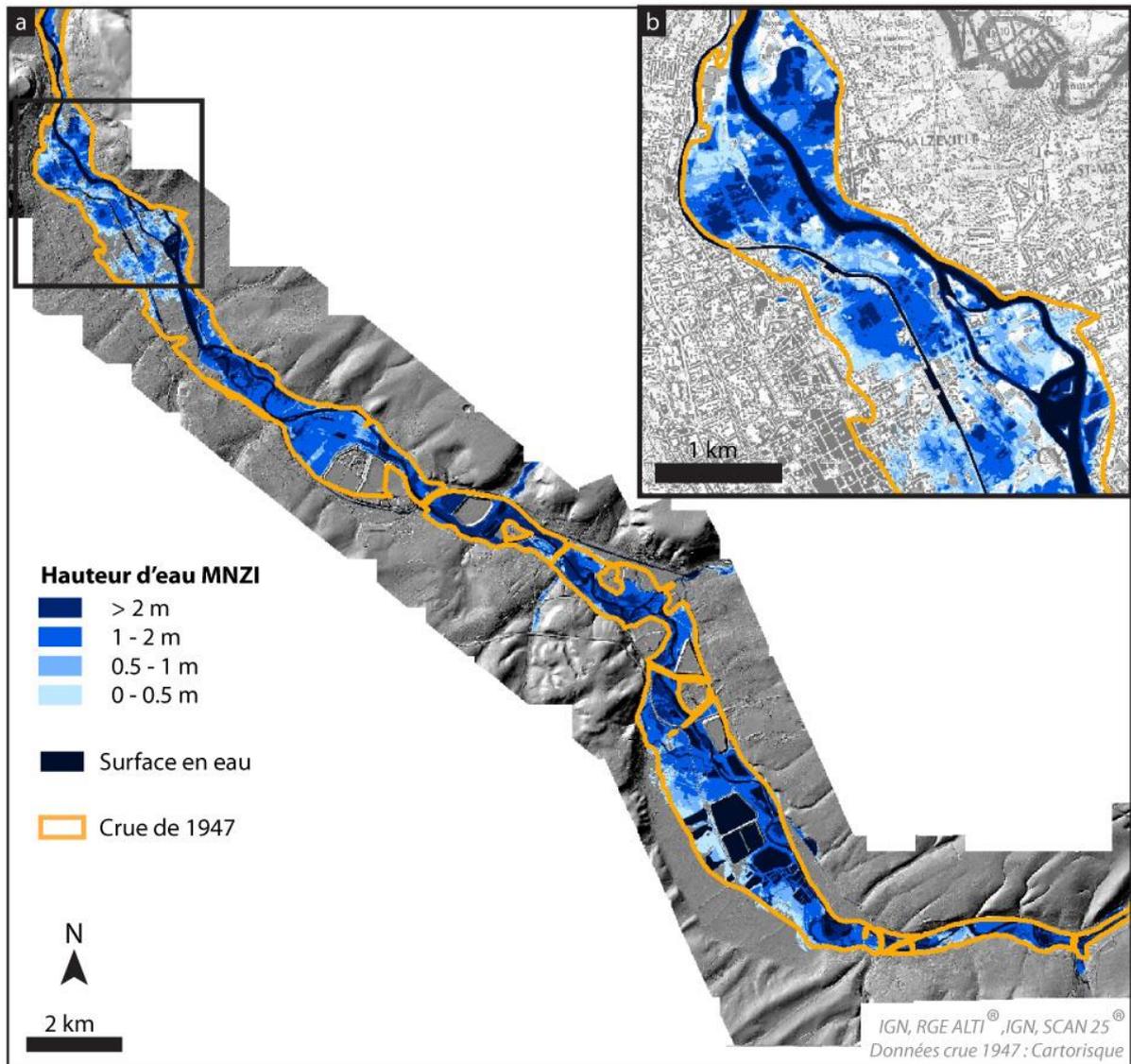


Figure 87 : Comparaison entre la crue de 1947 et le MNZI de la Meurthe aval (a) et zoom sur le secteur de Nancy (b)

3.3.5 Matane

3.3.5.1 Cartographie hydrogéomorphologique

Sur la rivière Matane, une cartographie a déjà été réalisée pour le compte du MSP (Ministère de la Sécurité Publique), dans le cadre d'une étude expérimentale (Demers *et al.*, 2012; Olsen *et al.*, 2011). Nous réalisons également une délimitation des zones inondables, à partir d'une interprétation du

LiDAR. L'emprise des deux cartographies est identique, à quelques exceptions imputables à la précision de la cartographie. Notons tout de même qu'il existe des incertitudes relatives à l'inondabilité de certaines portions externes du lit majeur, en raison du phénomène de glacio-isostasie. Ce point sera développé dans le chapitre 4. Nous choisissons la cartographie réalisée en 2011 pour le compte du MSP comme limite de zone inondable de référence pour la suite du MNZI de la Matane.

3.3.5.2 Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers

La rivière Matane se voit attribuer 33 profils répartis sur 30 km (Figure 88). Le profil longitudinal est homogène, avec une pente moyenne de 1,6 ‰. Le positionnement des profils demande de prendre en compte la variation de la largeur du lit majeur (200 m à 600 m), mais aussi des affluents qui apportent une modification dans le tracé des zones inondables, en particulier la Petite Matane, affluent de rive droite.



Figure 88 : Localisation des profils en travers sur le secteur d'étude de la rivière Matane. (Source cartographie HGM : UQAR, 2011)

3.3.5.3 Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur la Matane

Les sections de contrôle de la Matane sont au nombre de quatre, espacées de 10 km. Afin de valider les cotes des profils, les débits obtenus sont comparés avec ceux de la crue centennale issus d'un rapport du Centre d'Expertise Hydrique du Québec(2004).

Avant de présenter les résultats de chacun des profils, intéressons-nous à un cas qui illustre parfaitement l'intérêt des sections de contrôle. Le profil 31 du MNZI de la Matane correspond à la section de contrôle la plus en aval (Figure 89). Lors de la détermination de la cote de crue de ce profil, une cote de 12,2 m semble appropriée. Elle permet d'inonder ce que l'on interprète en rive droite comme le lit majeur, largement occupé par des logements individuels. Or, cette cote retenue au premier abord correspond à un débit de 4000 m³/s, qui comparés aux 799 m³/s de la crue centennale semble pour le moins irréaliste. Après une deuxième expertise de terrain il s'avère que la rive droite visible sur le profil est entièrement remblayée, ce qui a faussé le jugement. La cote de 10,25 m est finalement choisie. En outre, cela permet de retrouver un rapport crue HGM/Q100 proche des autres sections de contrôle (Tableau 8).

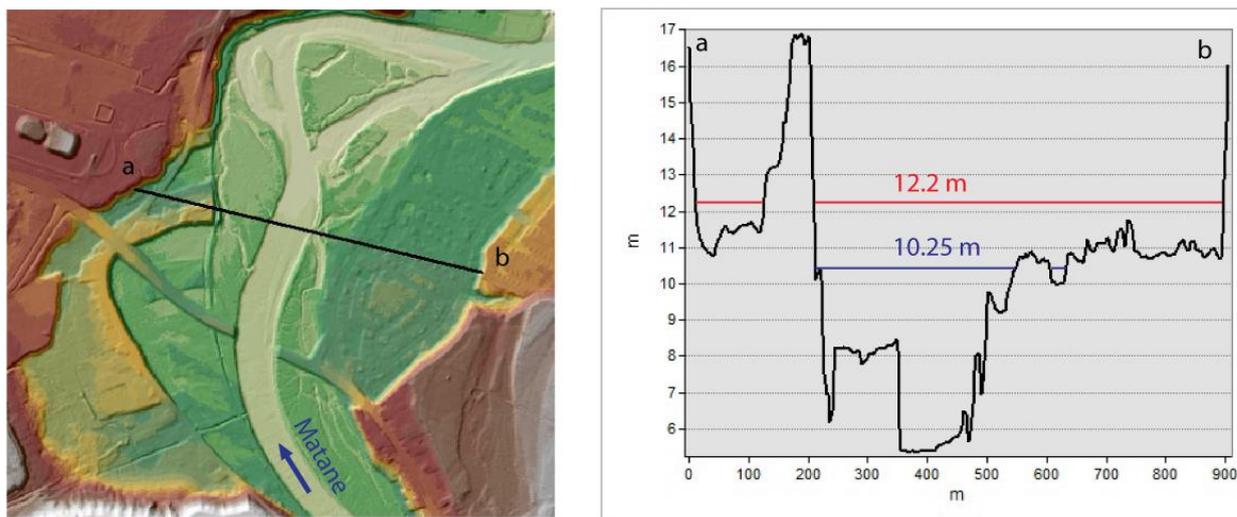


Figure 89 : Vue en plan et en coupe du profil 31 sur la rivière Matane

Profil	Q100		HGM		HGM/Q100
	Débit	Rapport P2/Px	Débit	Rapport P2/Px	
P2	442	1.00	672	1.00	1.52
P10	552	1.25	825	1.23	1.49
P20	739	1.67	935	1.39	1.27
P31	799	1.81	1100	1.64	1.38

Tableau 8 : Comparaison des débits de la Q100 et du MNZI au droit des sections de contrôle de la Matane

3.3.5.4 MNZI de la Matane

Pour la rivière Matane, nous disposons de deux points de comparaison. En premier lieu, la cartographie hydrogéomorphologique réalisée pour le MSP. Et les zones de « grands courants » et « faibles courants » produites à partir d'une modélisation hydraulique de crues statistiques, par le CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec).

Les limites des zones inondables ont servi à l'élaboration du MNZI et sont, à quelques exceptions près, identiques à l'emprise du MNZI. De plus, les niveaux 1, 2 et 3 de la cartographie hydrogéomorphologique sont cohérents par rapport aux hauteurs d'eau du MNZI.

Les niveaux 1 (équivalent du lit moyen en France) présentent tous des hauteurs d'eau de près de 2 m de moyenne et peuvent dépasser 3 m dans les secteurs les plus bas. Les niveaux 2 sont plus homogènes. Ils montrent des hauteurs d'eau de 1,5 m de moyenne, qui cachent des différences importantes à l'intérieur de chaque unité en raison des quelques axes d'écoulement présents. Les niveaux 3 correspondent à de grandes surfaces planes dans lesquelles se situent des paléo-chenaux encore inondables essentiellement par remontée de nappe. Ces paléo-chenaux peuvent représenter des hauteurs d'eau non négligeables (1 à 2 m). Près de la moitié des niveaux 3 sont inondables de manière résiduelle.

Au Québec, les Municipalités Régionales de Comté (MRC) ont la charge de l'aménagement du territoire, par le biais d'un schéma d'aménagement (Caron *et al.*, 2009). A ce titre, la prise en compte du risque d'inondation dans la planification territoriale est également une nécessité. Les MRC s'appuient sur la Politique de Protection de Rives, du Littoral et des Plaines inondables (PPRLP⁸⁰) afin d'identifier les contraintes d'urbanisme liées aux zones inondables.

La définition de l'aléa est habituellement confiée au CEHQ qui dépend du MDDEFP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs). Deux classes d'aléa sont produites pour la PPRLP. La zone de grand courant est « inondée lors d'une crue de récurrence 20 ans ». La zone de faible courant est « inondée lors d'une crue de récurrence 100 ans ».

La comparaison entre le MNZI et les cartographies produites dans le cadre de la PPRLPI est riche en enseignements (Figure 90). Le MNZI remplit entièrement la zone inondable, à l'exception des cônes torrentiels et des affluents. La cartographie des crues centennales et vingtennales présente une extension plus faible que la zone inondable. Elle se limite souvent à l'étendue du lit mineur et du lit moyen, mais elle n'atteint jamais le niveau 3 de la cartographie hydrogéomorphologique. Le MNZI donne véritablement la sensation d'une enveloppe maximisante des zones inondables. La juxtaposition avec les crues modélisées montre à quel point le calcul d'une crue centennale n'est pas suffisant pour cartographier un évènement extrême, du moins pour la rivière Matane.

⁸⁰ Gouvernement du Québec, 2005. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R35.HTM

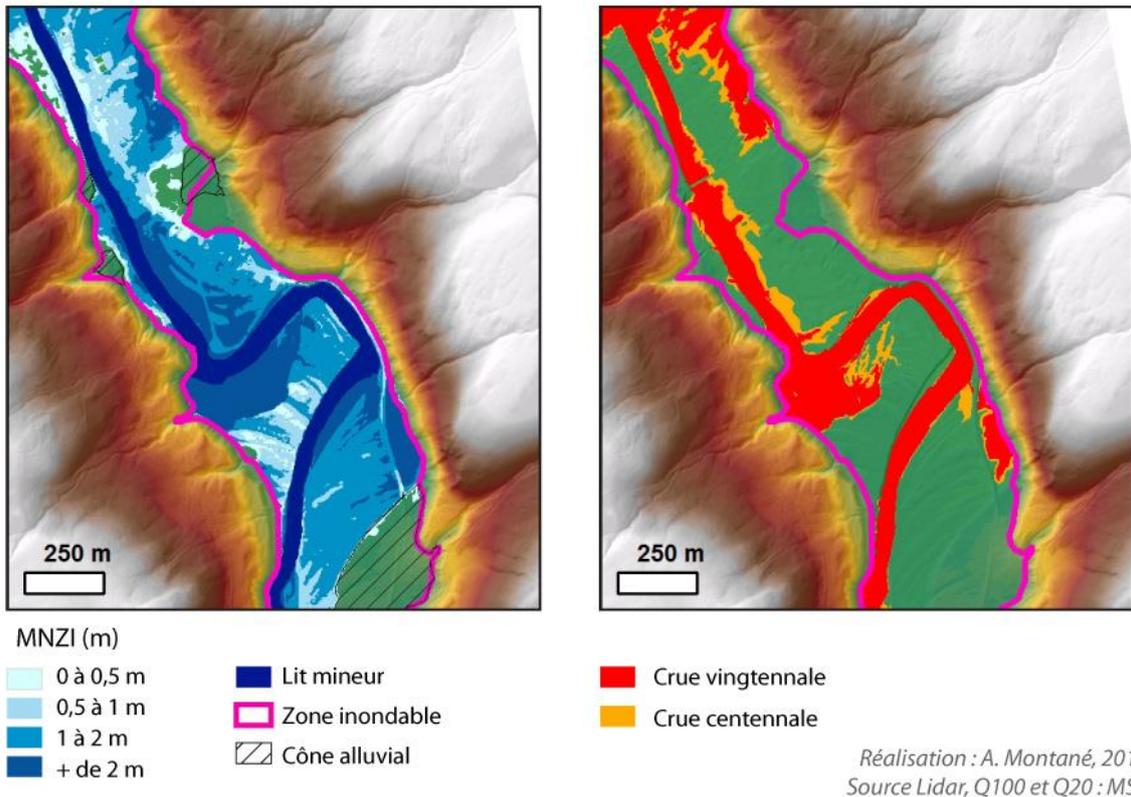


Figure 90 : Comparaison entre le MNZI de la Matane, la crue vingtennale et centennale

Dans l'optique de situer le niveau d'intensité de la crue représentée par le MNZI, nous devons le comparer avec des crues supérieures à la crue centennale. Le rapport fourni par GENIVAR (2005) au CEHQ précise le débit millénal et déca-millénal de la rivière Matane, au droit du barrage Mathieu d'Amours, proche du profil 31. Pour les crues printanières le débit instantané millénal est de 1197 m³/s et s'élève à 1487 m³/s pour le débit déca-millénal. Le débit estimé pour le MNZI au profil 31 est de 1100 m³/s. Compte-tenu des marges d'erreur dans l'estimation des débits, nous pouvons conclure que le MNZI s'approche d'une crue millénale, mais qu'il reste bien inférieur à un hypothétique débit déca-millénal.

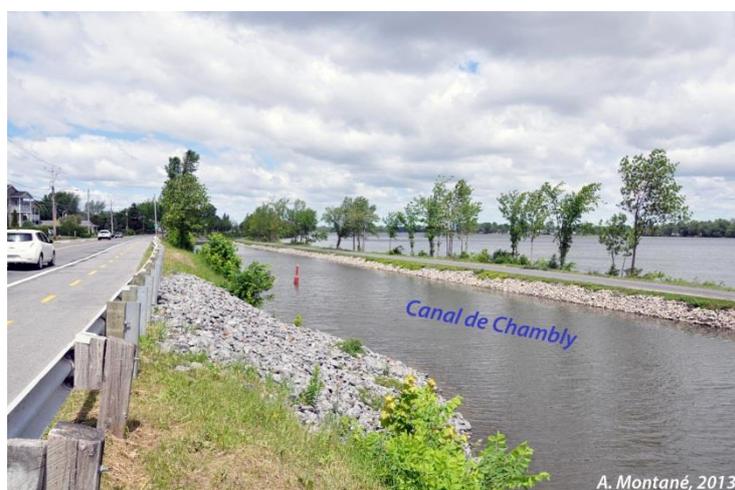
3.3.6 Richelieu

Le MNZI réalisé sur la rivière Richelieu est le dernier réalisé dans le cadre de cette thèse. Ce cours d'eau qui sort directement du lac Champlain présente plusieurs intérêts. Du point de vue de la cartographie hydrogéomorphologique, il permet de se confronter à un milieu physique a priori très défavorable en raison de la très faible énergie du cours d'eau. Cependant, la survenue de la crue de 2011 fournit un point de comparaison solide aux différents résultats. La particularité du MNZI de la rivière Richelieu est d'être réalisé sans sections de contrôle. Cette absence s'explique par le manque de données bathymétriques qui rendent toute estimation du débit pour le moins hasardeuse.

3.3.6.1 Cartographie hydrogéomorphologique

Les principales perturbations à l'interprétation demeurent la présence d'héritages glaciaires, la dynamique lacustre et l'anthropisation de la plaine alluviale.

L'encaissant dans lequel s'écoule la rivière Richelieu est constitué de sédiments marins issus de la mer de Champlain (Occhietti et Richard, 2003; Parent et Occhietti, 1988). Ces matériaux fins composés d'argiles ne se distinguent pas du lit majeur sur le plan sédimentologique. De plus, la jonction entre l'encaissant et le lit majeur s'effectue par du colluvionnement qui crée une continuité entre les deux unités. Enfin, l'anthropisation du lit majeur et en particulier le canal de Chambly, dans la traversée urbaine de Saint-Jean-sur-Richelieu complique l'interprétation des formes (Photographie 8).



Photographie 8 : Le canal de Chambly en rive gauche de la rivière Richelieu

Depuis la frontière des États-Unis jusqu'à Saint-Paul-de-l'Ile-aux-Noix, la rivière Richelieu a une dynamique quasi-lacustre (Photographie 9). Aucun courant n'est perceptible. La transition entre le cours d'eau et le versant ne présente aucune discontinuité topographique. Cet aspect diminue progressivement vers l'aval, à mesure que la rivière Richelieu prend une dynamique fluviale.



Photographie 9 : La rivière Richelieu en amont du secteur d'étude

Malgré ces limites, la cartographie des zones inondables reste possible. L'interprétation demande de changer le regard porté sur les zones inondables. Tout d'abord, la distinction entre le lit majeur et l'encaissant est certes difficilement perceptible, mais elle reste possible. Il faut tout d'abord prendre en considération la faiblesse de la pente longitudinale de la rivière. Entre l'amont et l'aval du secteur d'étude, soit un linéaire de 20 km, la ligne d'eau baisse de seulement 1,5 m. La conséquence de ce milieu à très faible énergie se répercute sur la morphologie des lit majeurs. Ceux-ci ont une pente transversale de 0 %. Dès qu'une surface dépasse 1 % cela correspond au versant, au talus du lit mineur, ou à un remblai. Sur la Figure 91, on observe que la forme du lit majeur est bien présente. Elle se distingue des versants qui possèdent des pentes plus élevées. La distinction entre une pente de 0,7 % et une pente de 0 % s'avère très compliquée sans un MNT LiDAR.

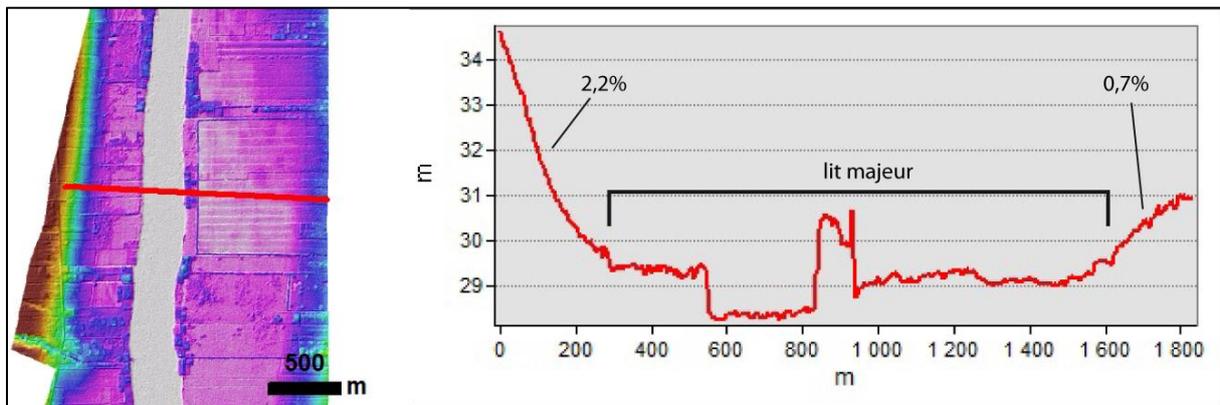


Figure 91 : Profil en travers sur la rivière Richelieu

En amont de Saint-Jean-sur-Richelieu, le lit majeur correspond en grande partie à des zones humides. Ces espaces sont fréquemment inondés par des crues printanières et présentent une végétation sans doute adaptée à la présence d'eau. Bien qu'inondables, ces espaces sont très attractifs pour l'urbanisation. De nombreuses habitations rehaussées sont construites au bord de la rivière et nécessitent la présence d'une route souvent fortement remblayée et qui traverse les zones inondables (Photographie 10).



Photographie 10: Route remblayée en zone inondable qui relie des habitations à la route principale

En dehors des zones inondables recouvertes par des zones humides, l'identification des zones inondables demande de repérer la moindre variation de la topographie. Sur la Photographie 11, le lit majeur se distingue car il est parfaitement horizontal. En revanche, l'encaissant est visible grâce à une petite butte sur laquelle est bâtie une grange. La limite de la zone inondable se situe au niveau de la route.



Photographie 11 : Distinction entre le lit majeur et l'encaissant pour la rivière Richelieu

Cette périurbanisation qui semble récente au vu des constructions, montre que ces zones inondables ont été non occupées pendant longtemps. La grande majorité des constructions de Saint-Jean-sur-Richelieu se situe hors des zones inondables.

En résumé, l'identification du lit majeur de la rivière Richelieu répond à un schéma simple (Figure 92). Ce sont tout d'abord des espaces qui ne présentent aucune variation naturelle de la topographie. Les axes d'écoulement visibles sur d'autres cours d'eau n'existent pas ici, en raison de l'absence totale d'hydrodynamisme. Les zones inondables présentent une surreprésentation de végétation arborée. Les zones les plus basses de ces zones inondables sont occupées par des zones humides. Enfin les enjeux

essentiellement composés d'habitations individuelles, se situent le plus souvent au bord de la rivière. Précisons que les axes routiers principaux se trouvent à l'extérieur de la zone inondable et très souvent en bordure de celle-ci. Les zones non inondables sont moins boisées et demeurent essentiellement couvertes par des exploitations agricoles, mise à part la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu.

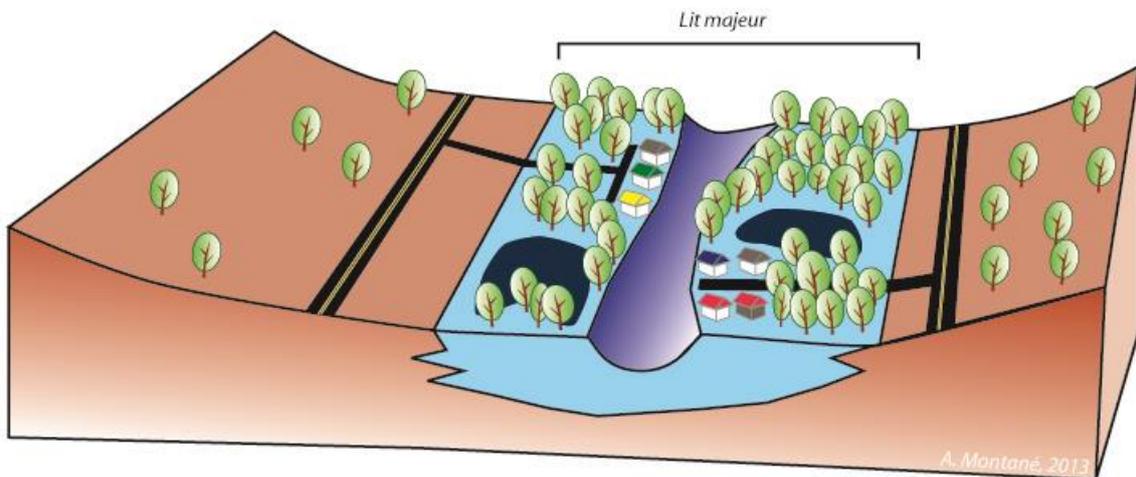


Figure 92 : Schéma des zones inondables de la rivière Richelieu

L'identification des zones inondables sur la rivière Richelieu semble plutôt déroutante au premier abord. La faute en incombe à l'absence de rupture de pente nette qui tranche avec les autres sites étudiés. Pourtant, dès lors que le fonctionnement du cours d'eau est compris, la cartographie des zones inondables se révèle plus rapide que pour les autres sites. En effet, la plaine alluviale ne montre pas de discontinuités majeures.

3.3.6.2 Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers

Le MNZI comporte peu de profils en comparaison des autres sites, seulement 11 pour 20 km de linéaire. Cette particularité s'explique par la pente longitudinale très faible. Elle est inférieure à 0,1 ‰ en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu. L'espacement entre les profils peut s'élever jusqu'à 3,5 km tant la vallée de la Richelieu est homogène. Aucun affluent ne modifie significativement la forme de la zone inondable (Figure 93). En revanche, le resserrement de la largeur de la zone inondable et l'augmentation locale de la pente longitudinale au droit de la traversée urbaine de Saint-Jean-sur-Richelieu, nous invite à augmenter la densité de profils en travers.

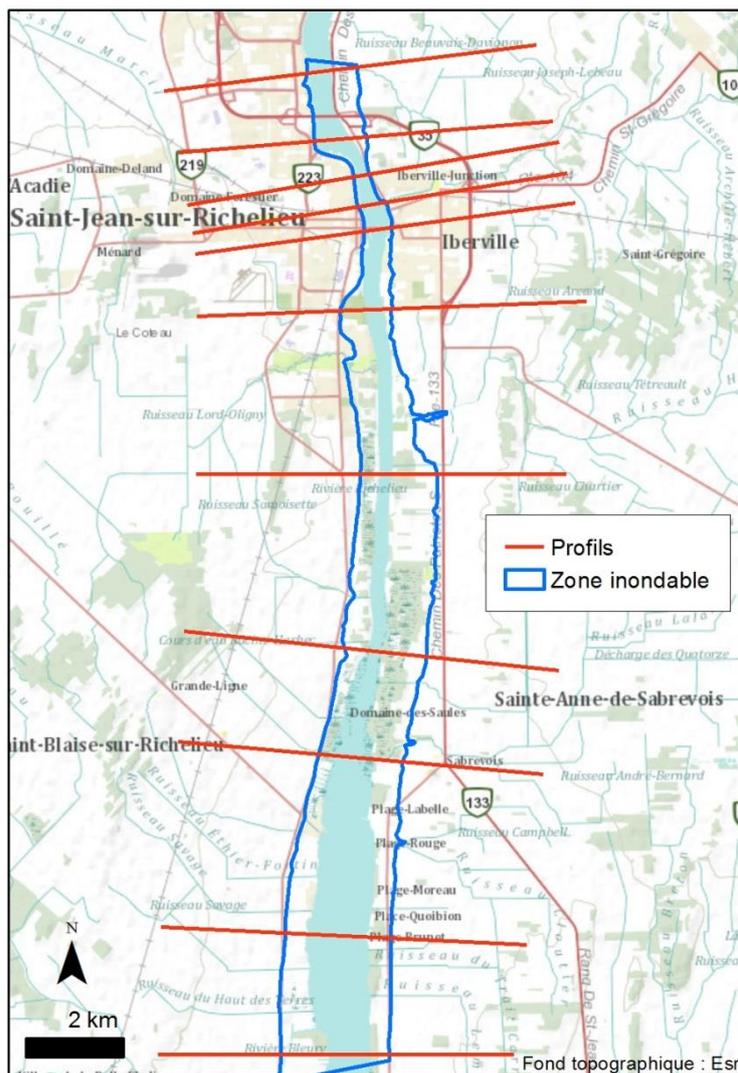


Figure 93 : Localisation des profils en travers et de la zone inondable pour le secteur d'étude de la rivière Richelieu

Le profil le plus en amont présente la cote de 31,2 m et le profil le plus en aval situé 20 km plus loin a la cote de 30 m. Sur cette distance, les cotes des profils se trouvent être un dégradé régulier entre les deux cotes situées aux extrémités du secteur d'étude. La détermination de toutes les cotes repose uniquement sur une interprétation hydrogéomorphologique.

3.3.6.3 MNZI de la Richelieu

Contrairement aux sites précédents, le MNZI de la rivière Richelieu présente peu de hauteurs d'eau supérieures à 2 m en lit majeur. Les hauteurs d'eau cartographiées correspondent à l'emprise du lit majeur observé sur le terrain.

Nous disposons d'une enveloppe de la zone inondée du 7 mai 2011, déterminée par le satellite canadien RADARSAT. De manière générale les limites du MNZI montrent une bonne correspondance

avec la crue historique (Figure 94). Bien que légèrement supérieur en moyenne à la crue historique, le MNZI suit parfaitement les limites de l'inondation de 2011. La précision du MNT est ici un atout majeur pour la représentation fidèle des hauteurs d'eau. La très bonne correspondance entre les deux informations géographiques s'explique aussi par la simplicité de la géométrie de la plaine alluviale, notamment en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu. En effet, depuis l'amont du secteur d'étude jusqu'à la traversée urbaine, la pente longitudinale du lit majeur est quasi nulle. Il devient dès lors très aisé d'associer les formes visibles sur le terrain avec la cote du MNZI. Le centre-ville de Saint-Jean-sur-Richelieu n'est pas concerné par le MNZI. Il est plus élevé de plusieurs mètres par rapport aux zones inondables de la Richelieu en amont. En revanche la portion aval de Saint-Jean-sur-Richelieu montre des différences entre le MNZI et la zone inondée en 2011 (Figure 94). Cette différence peut s'expliquer en partie par la présence d'un remblai en bordure du cours d'eau. Il reste également que la pente de la plaine augmente brutalement au droit de la ville et permet un écoulement des eaux plus aisé vers l'aval.

Comme pour la rivière Matane, nous disposons des enveloppes des crues centennales et vingtennales produites dans le cadre de la PPRLPI (Figure 95). La comparaison entre les trois informations géographiques montre que le MNZI ne dépasse que d'une centaine de mètres l'emprise de la crue centennale.

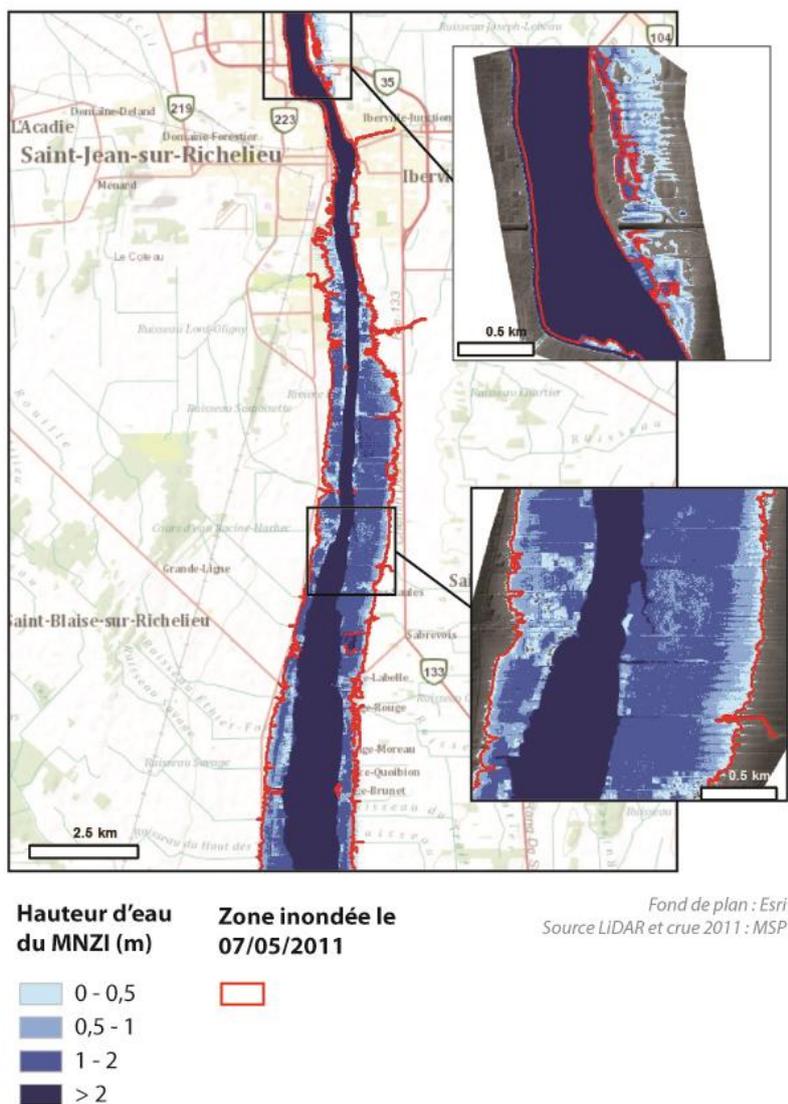


Figure 94 : Comparaison entre le MNZI de la Richelieu et la zone inondée le 07/05/2011

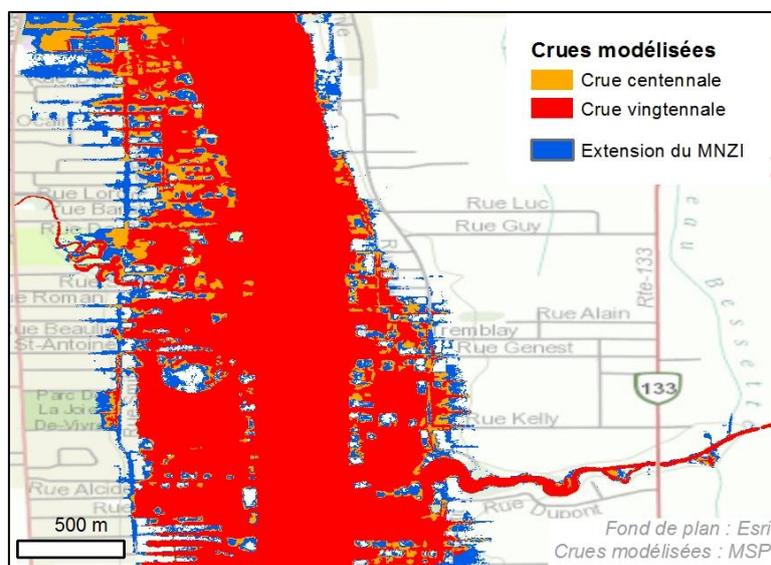


Figure 95 : Comparaison entre le MNZI de la Richelieu, la crue centennale et vigtennale

La concordance spatiale entre le MNZI, les crues de la PPRLPI et la crue historique de 2011 prouvent la réalité tangible des zones inondables de la rivière Richelieu. Cela constitue également l'occasion de réaffirmer que la cartographie hydrogéomorphologique ne doit pas se limiter aux cours d'eau à crue rapide. Les cours d'eau à crue lente marqués par des modelés peu marqués deviennent des objets d'étude potentiels grâce au LiDAR qui autorise l'étude de la microtopographie.

3.4 Mise en pratique du MNZI

Nous avons présenté les aspects techniques de la réalisation de MNZI. Dans l'optique d'une utilisation plus répandue, il devient nécessaire de détailler certaines caractéristiques du MNZI. Nous présentons tout d'abord les temps de réalisation d'un MNZI. Puis, avec l'exemple des cartes réalisées pour le TRI de la Meurthe, nous examinons la place que peut prendre cette méthodologie à l'avenir.

3.4.1 Comparaison entre le temps de réalisation d'un MNZI et de modèles hydrauliques

3.4.1.1 Le MNZI

Notons que les temps de réalisation mentionnés sont ceux d'une étude menée par un bureau d'étude. La méthodologie est supposée maîtrisée par l'ingénieur en charge de l'étude.

L'objectif est d'obtenir un shapefile représentant les hauteurs d'eau de la crue extrême à partir d'un MNT LiDAR. Cinq grandes phases sont distinguées. Pour chacune des phases nous détaillons le nombre de jours nécessaires pour la réalisation d'un MNZI de 50 km. Nous insistons sur la variabilité du nombre de jours en fonction du linéaire étudié.

La première phase correspond à la cartographie des zones inondables. Cette étape peut s'étendre jusqu'à 2 jours pour les secteurs les plus difficiles à interpréter. Un seul jour peut être nécessaire pour les linéaires plus réduits.

Pour la phase de terrain, le temps de réalisation est véritablement dépendant du linéaire étudié. Un jour pour 10 km est un ratio qui laisse le temps de vérifier si les limites de zones inondables sont correctes. Nous arrivons donc à un total de 5 jours de terrain pour 50 km. L'expertise de terrain reste également l'occasion de mieux évaluer par la suite la pertinence des hauteurs d'eau représentées.

Le positionnement des profils s'étale au minimum sur 2 jours pour un linéaire de 50 km. Dans les faits, le positionnement des profils s'effectue en une journée, mais il reste souvent nécessaire de procéder à des retouches suite à la constatation d'erreurs dans les étapes suivantes.

La quatrième phase concerne la détermination d'une cote de crue par profil. C'est le travail le plus minutieux qui demande de nombreuses corrections. Cela comprend également la réalisation des sections de contrôle. Comme pour la phase de terrain, un minimum d'un jour est nécessaire pour 10 km.

Enfin, la dernière phase comprend le passage des profils en travers en cartes de hauteurs d'eau. Cette tâche, qui est automatisée grâce aux logiciels de SIG, ne dure qu'un jour quel que soit le linéaire. Il est donc nécessaire de compter autour de 15 jours de travail pour produire un MNZI sur un linéaire de 50 km.

Etapes de réalisation d'un MNZI	Temps de réalisation pour un linéaire de 50 km
Cartographie des zones inondables	2
Expertises de terrain	5
Positionnement des profils en travers	2
Attribution d'une cote par profil	5
Création du MNZI	1
TOTAL	15

Tableau 9 : Temps de réalisation d'un MNZI de 50 km

3.4.1.2 Les modèles hydrauliques

Il s'avère peu pertinent de mettre en avant un nombre de jours précis pour la réalisation d'un modèle hydraulique sur un linéaire de 50 km. En effet, beaucoup de paramètres peuvent faire varier la durée de l'étude.

Tout d'abord le type de modélisation réalisée. Oublions dès maintenant les modèles 2D dont la réalisation ne présente aucun intérêt pour une cartographie de l'aléa inondation sur 50 km, tant les coûts sont élevés. Une modélisation 1D présente une durée de réalisation moins importante qu'un modèle à casiers.

Ensuite, la question des données hydrologiques disponibles reste primordiale. Dans le cas où une crue centennale doit être calculée cela représente une charge de travail supplémentaire. En revanche, si le maître d'ouvrage fournit les données hydrologiques, cette étape est accélérée.

Comme le recommande la « Directive Inondation », pour les scénarios de crue moyenne et extrême les ouvrages hydrauliques sont considérés comme transparents⁸¹. La prise en compte des ouvrages ne constitue donc plus une contrainte pour ces scénarios de crue.

⁸¹ MEDDE, 2012. Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (No. DEVP1228419C). Texte non paru du Journal Officiel. 40 p.

Après concertation avec des hydrauliciens de BURGEAP, des nombres de jours peuvent être avancés pour la réalisation du modèle et des cartes de hauteur d'eau. Pour un modèle 1D, un minimum de 18 jours est à prévoir. Au-delà de ce temps de travail il convient de prendre en compte la réalisation de profils topographiques par un géomètre pour compenser l'absence de bathymétrie. Il en résulte un coût supérieur de 100 % par rapport à celui d'un MNZI, pour un linéaire de 50 km. Quant au résultat, il reste similaire au MNZI et dans le cas d'une crue centennale, il n'a aucune validité sur le plan géomorphologique. En revanche, dans l'hypothèse où le modèle hydraulique cherche à reproduire la crue géomorphologique, via la méthode intégrée (Chave, 2003), l'emprise de la zone inondée serait très proche du MNZI.

Dans le cas d'un modèle à casier, un minimum de 40 jours est nécessaire uniquement pour monter la géométrie du modèle. A cela doivent s'ajouter d'éventuelles études hydrologiques et la réalisation des cartes de hauteur d'eau. Tout comme pour les modèles 1D, il reste nécessaire de recourir aux services d'un géomètre pour obtenir la topographie complémentaire dans le lit mineur.

La réalisation d'un MNZI est moins chronophage qu'un modèle hydraulique et ne nécessite pas de données topographiques complémentaires au LiDAR. De plus, ses résultats garantissent de représenter une crue extrême cohérente par rapport à la géomorphologie de la zone inondable.

3.4.1.3 Avantages et inconvénients de chacune des approches

Le MNZI permet de conserver certains avantages de la cartographie hydrogéomorphologique tout en améliorant notamment des aspects liés au rendu cartographique (Tableau 10). Le MNZI reste une méthode relativement rapide à mettre en œuvre. En outre, une fois le MNT LiDAR disponible, il n'est plus nécessaire d'acquérir des données topographiques telles que des profils pour le lit mineur dans le cadre d'une modélisation hydraulique. De plus, le MNZI fournit toujours une correspondance entre la cartographie produite et les formes observées dans la plaine alluviales. Il reste donc possible d'associer la limite de zone inondable visible lors d'une visite de terrain avec la cartographie des hauteurs d'eau. La correspondance spatiale entre une crue centennale et un lit majeur est possible mais demeure tout à fait fortuite.

Le MNZI se distingue de la cartographie hydrogéomorphologique par sa capacité à représenter des hauteurs d'eau. La prise en compte des ouvrages hydrauliques ou des remblais ne fait pas l'objet de calculs, mais la précision du MNT LiDAR permet « d'extraire » de la zone inondable des portions de terrains largement au-dessus de la ligne d'eau du MNZI.

En revanche, tout comme pour la cartographie hydrogéomorphologique, il n'y a pas de correspondance entre des récurrences de crue et les cartographies produites, contrairement à la modélisation hydraulique d'une crue statistique.

	Cartographie HGM	MNZI	Modèle hydraulique / hydrologique
Rapidité de réalisation	++	+	-
Besoin de données topographiques complémentaires	++	++	-
Correspondances entre la cartographie finale et la morphologie de la plaine alluviale	++	++	--
Représentation des hauteurs d'eau	--	++	++
Prise en compte d'ouvrages hydrauliques	--	-	++
Correspondances entre la cartographie finale et des récurrences de crue	--	--	++

Tableau 10 : Avantages et inconvénients de la cartographie hydrogéomorphologique, du MNZI et d'une modélisation hydraulique

3.4.2 Un MNZI pour la « Directive Inondation » : retour d'expérience

Les MNZI réalisés sur la Meurthe sont aujourd'hui intégrés dans la cartographie de la « Directive Inondation ». Ils correspondent aux TRI de Saint-Dié-des-Vosges/Baccarat et Nancy/Damelevières.

Au-delà des aspects techniques et des résultats des MNZI déjà abordés, d'autres enseignements apparaissent. Tout d'abord, la définition réglementaire de la crue extrême entraîne quelques interrogations. Ensuite la question de la valeur de la crue extrême par rapport aux autres données émerge, notamment dans les échanges avec les communes concernées. Enfin, nous verrons comment la cartographie du risque inondation de la directive met en valeur ce que représente une crue hydrogéomorphologique.

La circulaire ministérielle de 2012⁸² précise que la crue extrême peut être obtenue grâce à la limite externe du lit majeur. Dans le cas où l'emprise du lit majeur correspond à celle d'une crue historique, des ajustements deviennent nécessaires. En effet, la crue extrême et la crue moyenne s'avèrent identiques. Afin de remédier à cette situation, le ministère recommande de rehausser la ligne d'eau de la crue extrême.

⁸² MEDDE, 2012. Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (No. DEVP1228419C). Texte non paru du Journal Officiel. 40 p.

Ce cas de figure a été observé pour la Meurthe. Dans le TRI de Nancy, l'extension entre la crue de 1947 et le lit majeur est identique. Après discussion avec la DREAL Lorraine, la cote de la crue extrême est séparée de celle de la crue moyenne de 20 à 30 cm. La concordance planimétrique entre les deux scénarios de crue se produit notamment pour le TRI de Nancy. Il en résulte deux scénarios de crue à l'emprise identique, mais différentes d'un point de vue altimétrique (Figure 96).

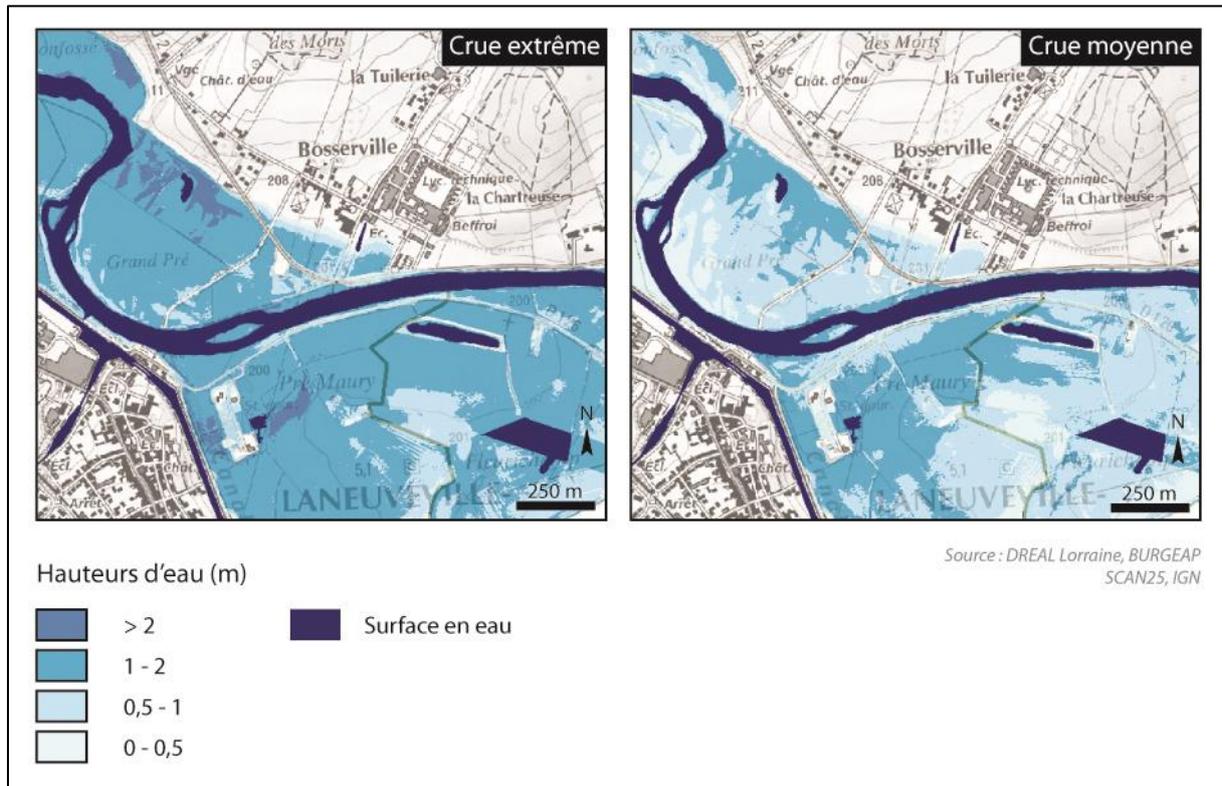


Figure 96 : La crue extrême et la crue moyenne du TRI de Nancy/Damelevières

La modification de la ligne d'eau du MNZI est révélatrice d'un fait. En théorie, la cartographie de l'aléa inondation est une le résultat d'une réflexion objective. Mais dans la pratique, l'aléa inondation fait toujours l'objet de discussions avec le maitre d'ouvrage et reste tributaire des normes établies par les textes règlementaires.

Au cours des réunions techniques, la crue extrême accapare la majorité des débats. Cela s'explique par la nouveauté du terme, sa définition encore floue et les nombreux enjeux qu'elle concerne. L'Etat cherche à prévenir une éventuelle exaspération des communes face à ce nouveau type d'aléa inondation. Pour cela la communication autour de la crue extrême se focalise sur deux points. Avant tout la DREAL insiste sur le fait que la cartographie de la crue extrême ne remet pas en cause les PPRI déjà approuvés. Ensuite, l'accent est placé sur l'atout que constitue la crue extrême pour la gestion de crise, en particulier grâce à la carte des risques (Figure 97). Ajoutons que les cartes de risque constituent un outil bien plus efficace qu'une carte d'aléa pour représenter les dysfonctionnements potentiels engendrés par les inondations.

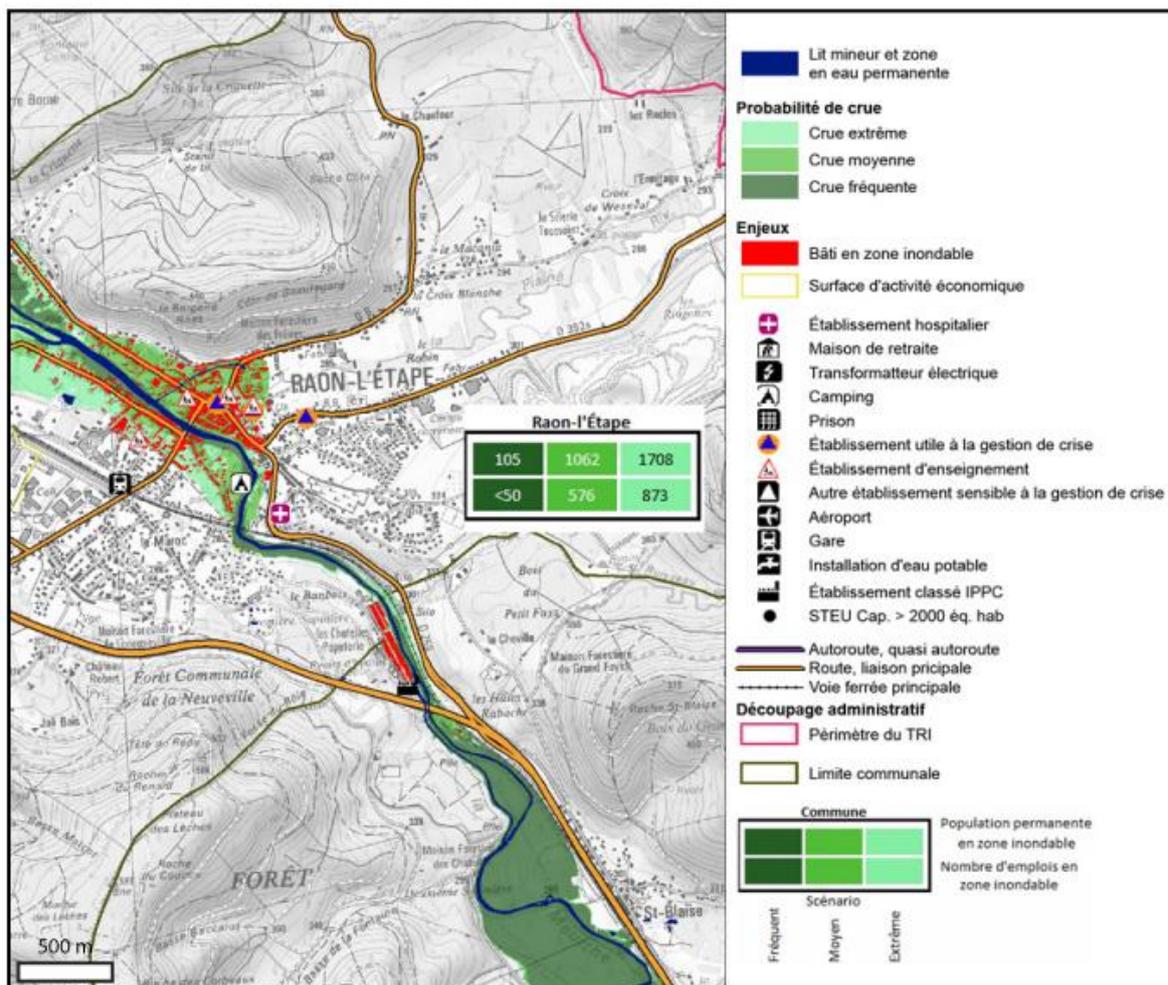


Figure 97 : Extrait de la cartographie des risques d’inondation sur le TRI de Saint-Dié-des-Vosges-Baccarat

3.5 Discussion

3.5.1 Apports des MNT LiDAR pour la cartographie des zones inondables et la réalisation de MNZI

Les MNT LiDAR sont un atout pour la cartographie hydrogéomorphologique. Ils permettent d’identifier rapidement les ruptures de pentes caractéristiques des limites de zone inondable. Leur utilisation est très efficace pour les cours d’eau présentant des limites nettes. Mais, mais admettons-le, cela est très prévisible. En revanche, la technologie LiDAR apporte une véritable plus-value pour les cours d’eau à crue lente caractérisés par une distinction peu nette entre le lit majeur et l’encaissant. C’est notamment le cas pour certains secteurs de la Meurthe et de la Richelieu. Enfin, le LiDAR

permet de mettre en avant une distinction primordiale pour l'adaptation de la cartographie hydrogéomorphologique dans des contextes physiques différents.

Le principal intérêt des MNT LiDAR pour la réalisation de MNZI reste la précision altimétrique et la résolution de ces données. Comme pour la cartographie hydrogéomorphologique, la possibilité de vérifier à tout moment les altitudes associées à des formes constitue un avantage par rapport à la photo-interprétation. Ajoutons que le format de fichier ASCII demeure bien plus maniable que les MNT sous forme de fichiers ponctuels ou XYZ. Aucune interpolation n'est nécessaire, ce qui permet de travailler sur un référentiel topographique unique entre plusieurs utilisateurs.

En plus de la précision altimétrique, la possibilité de quantifier les pentes s'est affirmée comme un paramètre majeur de l'interprétation hydrogéomorphologique. La distinction entre les zones inondables et les zones non inondables s'effectue aisément en analysant le niveau de pente (Figure 98). La majeure partie des sites d'étude se caractérisent par des limites de zones inondables où la pente locale est supérieure à 12 %. Cette pente tranche avec le lit majeur où la pente reste inférieure à 8 %. Seuls les remblais d'infrastructure, ou les chenaux d'écoulement présentent au sein de la zone inondable des pentes supérieures à 12 %.

Cette affirmation doit être nuancée. En effet, dans certains secteurs, l'encaissant possède la même pente que le lit majeur. C'est par exemple le cas des grands glacis d'épandage sur la Meurthe. Pour la rivière Richelieu, c'est tout le linéaire d'étude qui présente une absence de distinction entre l'encaissant et la zone inondable.

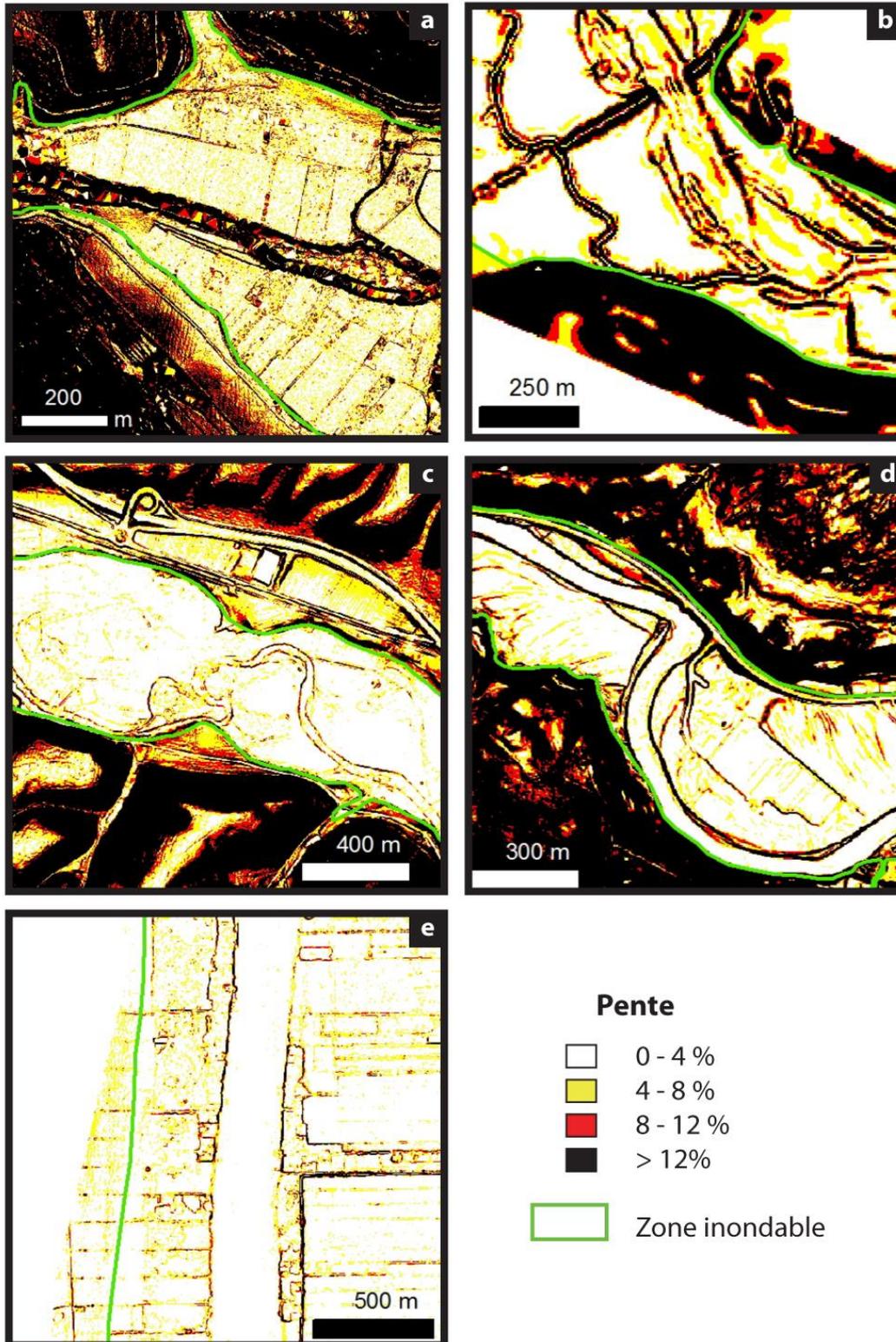


Figure 98 : Représentation de la pente pour l'Argens (a), le Gardon d'Alès (b), la Meurthe (c), la Matane (d) et la Richelieu (e)

3.5.2 Faisabilité de MNZI dans des milieux différents

La cartographie hydrogéomorphologique demeure un préalable à la réalisation du MNZI. Par conséquent, si les formes visibles sur le terrain sont bien intégrées par le géomorphologue, la suite de la méthodologie ne constitue pas une difficulté majeure.

De l'Argens à la Richelieu, la cartographie hydrogéomorphologique reste possible. L'adaptation de la méthode pour des cours d'eau à crue lente fait déjà l'objet de publications (Ballais *et al.*, 2011; Dupont *et al.*, 2005). La cartographie hydrogéomorphologique y est présentée comme réalisable mais sujette à caution, en particulier pour les secteurs qui présentent un colluvionnement important qui masque les limites de zones inondables (Ballais *et al.*, 2005).

La solution pour mieux appréhender les différences entre les sites étudiés se trouve dans la distinction entre les formes et les modelés. Cette nuance abordée par de nombreux géomorphologues, fait état des différents aspects d'un type de forme en fonction du climat et de la géologie (Cailleux *et al.*, 1968; Coque, 2002; Demangeot, 2002). La cartographie hydrogéomorphologique doit s'attacher à représenter les formes de la plaine alluviale en s'adaptant aux modelés.

Les différents types de modelés pour la plaine alluviale peuvent constituer un frein à la bonne compréhension de la méthode. Dans une optique de développement de la cartographie hydrogéomorphologique, il devient nécessaire de caractériser ces différents modelés et les modalités qui les mettent en place. L'identification des paramètres qui influencent les incertitudes et la précision des cartographies hydrogéomorphologiques (chapitre 4) permettra en particulier d'anticiper les problèmes liés au développement de la méthode dans des contextes physiques différents.

La cartographie hydrogéomorphologique s'est développée principalement sur des cours d'eau méditerranéens. Cependant, la réalisation de MNZI pour des cours d'eau à crue lente s'avère techniquement plus simple en raison de l'uniformité de la plaine alluviale. De plus, la représentation des hauteurs d'eau est bien plus pertinente pour des cours d'eau peu concernés par des vitesses d'écoulement élevées.

Il demeure nécessaire de préciser que la représentation cartographique d'un MNZI n'équivaut pas à celle d'une modélisation hydraulique. La principale différence réside dans la non prise en considération de l'impact des ouvrages anthropiques (remblais routiers, ponts...) sur la ligne d'eau.

3.5.3 La place du MNZI par rapport à la cartographie hydrogéomorphologique

Le MNZI n'a pas vocation à remplacer la cartographie hydrogéomorphologique. Ces deux données sont complémentaires. Comme l'explique MacEachren (1995, 1994), il n'existe pas une représentation cartographique unique d'un même phénomène. L'idée de rechercher une carte optimale n'est pas viable (Sluter, 2001). La cartographie hydrogéomorphologique permet de comprendre les formes observables dans une plaine alluviale. Le MNZI apporte une seule information : les hauteurs d'eau.

Cette information est particulièrement utile pour communiquer sur le phénomène de crue extrême et pour faciliter l'utilisation réglementaire de l'hydrogéomorphologie. Cette distinction de deux types de cartes est mis en avant par Di Biase (1990) qui différencie des cartes ayant pour objectif la communication et les cartes ayant pour objectif la réflexion. La cartographie hydrogéomorphologique appartient à la sphère de la réflexion. Le MNZI se trouve dans la sphère de la communication. Il constitue le lien entre la vision du géomorphologue et les normes contemporaines de représentation de l'aléa inondation.

Par ailleurs, le MNZI ne peut pas être employé pour réaliser des AZI à l'échelle de bassins-versants. L'application à l'ensemble du réseau hydrographique n'est pas pertinente. L'effort doit se concentrer sur les cours d'eau principaux. En conséquence, il devient utile d'évaluer une éventuelle simplification de la cartographie hydrogéomorphologique qui permettrait de mieux représenter l'aléa inondation.

3.5.4 L'emploi de MNZI pour représenter la crue extrême

Le MNZI correspond-il à la crue extrême demandée par la « Directive Inondation » ? Sur le plan technique, plusieurs éléments permettent d'apporter une réponse positive. Il serait opportun d'être plus mesuré pour la composante institutionnelle.

Le premier point en faveur du MNZI reste qu'il est bien possible de représenter les hauteurs d'eau correspondant à l'emprise du lit majeur. Cette emprise du lit majeur est associée à celle de la crue extrême demandée par la circulaire ministérielle⁸³. Ensuite, plusieurs crues historiques majeures (Meurthe, Gardon d'Alès et Richelieu) présentent des similitudes avec l'extension des MNZI. Ce sont autant de preuves supplémentaires que la cartographie hydrogéomorphologique correspond à une réalité.

Le MNZI correspond à la crue extrême d'un point de vue planimétrique, puisqu'il butte sur l'encaissant. D'un point de vue altimétrique, il reste toujours possible de représenter une crue millénaire qui pourra dépasser la cote définie dans le MNZI. Demeure cependant la question de la valeur des données hydrologiques employées. La récurrence de crue est fortement tributaire de la série de données des crues historiques employée et peut être réévaluée à la suite d'une crue extrême (Martin, 2010). Certains hydrologues vont plus loin en affirmant qu'il n'est possible d'estimer une crue millénaire statistiquement significative (Plate E.J., 2002).

Le dernier élément relatif à l'acceptation de la cartographie hydrogéomorphologique pour représenter la crue extrême n'a rien de scientifique. Il renvoie à la capacité des gestionnaires du risque inondation à sortir du paradigme du « tout hydraulique et hydrologique ». Il règne en effet un sentiment de défiance vis-à-vis de la cartographie hydrogéomorphologique. Ce sentiment est révélateur d'une réalité. En matière d'aléa inondation, ce sont bien les modèles hydrauliques et les estimations hydrologiques qui font office de méthodologies de référence. La cartographie hydrogéomorphologique

⁸³ MEDDE, 2012. Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (No. DEVP1228419C). Texte non paru du Journal Officiel. 40 p.

doit se soumettre aux codes techniques tels que les débits ou la récurrence de crue, pour espérer être considérée comme valable. Cette hiérarchie perdure solidement.

Depuis le développement de l'informatique, les informations chiffrées servent de garde-fou à la prise de grandes décisions. Cette boulimie de chiffres se retrouve aujourd'hui dans toutes les sphères de notre société. Des algorithmes qui régissent les marchés financiers aux chiffres du réchauffement climatique, les calculs et les chiffres rassurent mais inhibent toute volonté de comprendre les phénomènes (Sorente, 2011).

Il reste difficile d'associer de manière certaine le lit majeur hydrogéomorphologique à une récurrence de crue. De la Matane au Gardon, la crue millénale s'approche de l'emprise hydrogéomorphologique. Cette association de l'hydrogéomorphologie à une crue millénale est vérifiée par d'autres retours d'expérience sur les Gardons ou la Garonne (Latapie *et al.*, 2013). L'agitation provoquée par le concept de crue extrême amène également à identifier le double du débit centennal de l'Arc (Bouches-du-Rhône) comme le débit hydrogéomorphologique (David, 2013).

Un débit millénal demeure égal ou supérieur à l'enveloppe hydrogéomorphologique. En conséquence, la crue extrême doit correspondre à une crue millénale si l'entrée hydrologique est privilégiée et à l'emprise hydrogéomorphologique si la dimension spatiale de la crue est privilégiée. Dans le cas du choix d'une crue millénale pour représenter la crue extrême, cette dernière devra toutefois correspondre au minimum à l'enveloppe hydrogéomorphologique. Des exceptions sont envisageables dans le cas d'une anthropisation significative du lit mineur.

La cartographie hydrogéomorphologique nous invite à ne pas être uniquement tributaires de calculs, mais également de la réalité du terrain. Il faut vérifier par soi-même ce que représente la zone inondable. Il faut analyser les formes. Il convient de comprendre le fonctionnement du cours d'eau.

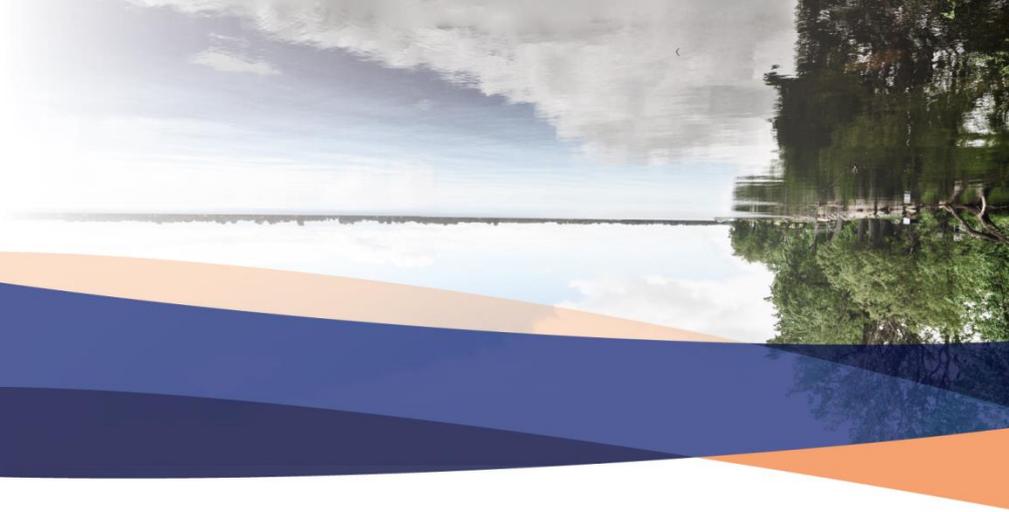
Par ailleurs, le concept de crue extrême est amené à devenir une référence de plus en plus prégnante. Dans cette perspective, il serait pertinent d'évaluer dans quelle mesure celle-ci peut correspondre à une crue historique. En effet, des informations historiques conservent une valeur bien supérieure à toute crue statistique ou cartographie hydrogéomorphologique lorsqu'il s'agit de gérer le risque d'inondation (Lang *et al.*, 2013). Or, la « Directive Inondation » exclut toute crue historique de la définition de crue extrême.

3.6 Conclusions

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons pu cartographier, par le biais de la méthode du MNZI, des hauteurs d'eau correspondant à l'extension de cartographies hydrogéomorphologiques. La réalisation de MNZI est possible dans les différents milieux étudiés, même s'il s'avère plus pertinent de les réaliser pour des cours d'eau à crue lente.

La production de MNZI constitue un atout pour la compréhension des crues extrêmes. L'aspect visuel et donc sa communication sont par ailleurs accrus par rapport à une cartographie hydrogéomorphologique. Le MNZI est une réponse directe à la demande édictée par la « Directive Inondation » et peut également se montrer à son avantage dans le cadre de PPRI

Nous ne prônons en aucun cas le remplacement des modélisations hydrauliques et hydrologiques par le MNZI, en tant que nouveau paradigme de l'analyse de l'aléa inondation. Chaque approche possède ses points forts et ses faiblesses et doit être employée en fonction des caractéristiques physiques et des enjeux concernés. Le MNZI doit constituer un nouvel outil dans les différentes approches de l'aléa inondation. La diversification des approches et de leur complémentarité constituent un élément clé pour rendre plus efficiente l'analyse de l'aléa inondation.



Chapitre 4

Application de la cartographie hydrogéomorphologique :
imprécisions, incertitudes et niveau de confiance
en fonction des environnements fluviaux

Une cartographie hydrogéomorphologique représente les formes observées et interprétées par le géomorphologue. Mais cette carte ne permet pas d’appréhender le niveau d’erreurs lié à sa réalisation. Or, d’un bassin versant à l’autre, les erreurs varient du tout au tout. On passe aisément de cours d’eau où la délimitation de la zone inondable « saute aux yeux » à d’autres portions où la délimitation du lit majeur s’apparente à un questionnement sans fin pour le géomorphologue.

L’arpentage des différents terrains d’étude en France et au Québec a fait surgir deux questions récurrentes et fondamentales. La première correspond à l’imprécision de la limite de zone inondable. La deuxième question renvoie à l’incertitude, lorsqu’il subsiste des doutes sur l’inondabilité de certaines portions de la zone inondable.

Par ailleurs, le fait de pouvoir comprendre et afficher les erreurs permettrait de les anticiper. Ceci constituerait un atout pour le développement de la cartographie hydrogéomorphologique sur de nouveaux territoires.

Ce chapitre comporte deux objectifs. Le premier objectif vise à décrire les paramètres des deux types d’erreurs : les incertitudes et les précisions. Puis dans un second temps nous cherchons à définir un niveau de confiance dans l’interprétation hydrogéomorphologique, reposant sur les deux types d’erreurs.

Afin de parvenir à cette typologie, nous nous appuyons sur les observations réalisées au cours du travail de thèse et dans le cadre de contrats commerciaux BURGEAP. Les différents paramètres présentés ont, pour la majorité d’entre eux déjà été mis en avant dans des publications antérieures.

4.1 Exemples d’environnements complexes pour la réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques

Avant de détailler les paramètres qui influencent le niveau de confiance attribué à une cartographie hydrogéomorphologique, nous proposons de présenter trois cas de figure de milieux pour lesquels nous avons rencontré de réelles difficultés dans la réalisation de la cartographie des zones inondables. Ce sont les secteurs de basse-plaine, les cours d’eau fortement anthropisés, ainsi que les cours d’eau présentant des héritages de l’Holocène.

4.1.1 Les basses plaines

Lors de la réalisation d’un AZI sur les cours d’eau se jetant dans l’étang de l’Or, entre Montpellier et Lunel, nous avons pu expérimenter un cas de figure complexe : les basses-plaines. Le substrat sur lequel s’écoulent les cours d’eau (Salaison, Cadoule...) débouchant dans l’étang se distingue difficilement du lit majeur. La lithologie est composée de colluvions anciennes et récentes, qui présentent une granulométrie limoneuse à graveleuse⁸⁴.

⁸⁴ BRGM, 2010. Carte géologique à 1 / 50 000. Montpellier. Notice explicative. 28 p.

Dans ce contexte, tous les indices qui permettent de cartographier les zones inondables sont flous. Il n'y a tout d'abord aucune rupture de pente nette. Les zones non inondables se situent à guère plus de 2 m au-dessus du lit majeur. Le profil en toit complique l'interprétation. La sédimentologie ne présente, du moins d'après les observations de terrain, aucune différence marquante. L'occupation du sol reste également similaire entre les zones inondables et l'encaissant. Seule la surreprésentation des centres-villes hors des zones inondables est un indice. Dans ce contexte, la cartographie des zones inondables est imprécise. La traversée du Dardaillon à Lunel-Viel illustre la difficulté de délimiter les zones inondables dans ce contexte.



Photographie 12 : Le Dardaillon à Lunel-Viel, Hérault (source : BURGEAP)

Une des particularités des cours d'eau s'écoulant dans des basses plaines est de présenter un profil transversal en toit. Cette configuration s'explique par l'aggradation du lit mineur qui produit par la suite un bourrelet de berge (Ballais *et al.*, 2011; Garry *et al.*, 2002; Masson *et al.*, 1996). La topographie des lits en toit induit, lors d'une inondation, des écoulements qui se dirigent vers l'extérieur de la zone inondable (Figure 99) située en contrebas du lit mineur souvent endigué, pour éviter ce phénomène.

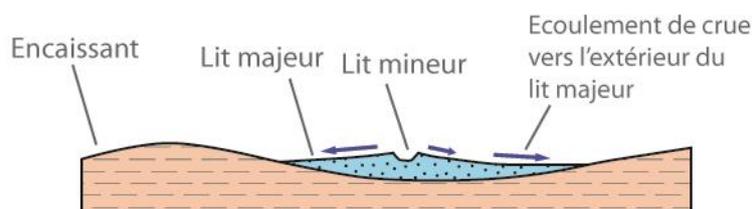


Figure 99 : Vue en coupe d'un lit en toit dans un secteur de basse plaine

L'Agly est un fleuve côtier qui se jette dans la Mer Méditerranée, au Nord de Perpignan, dans les Pyrénées-Orientales. Dans sa partie aval, le cours d'eau comporte un lit en toit. Jusqu'à la commune de Pia, la zone inondable est délimitée au Nord et au Sud par une terrasse alluviale située 10 m au-dessus du lit majeur. C'est précisément sur cette terrasse alluviale que repose le centre-ville de Pia. Le 6 mars 2013, suite à des précipitations intenses dans le massif des Corbières, une crue de l'Agly se produit. Cette crue entraîne notamment une rupture de digue sur la commune de Pia (Photographie 13). Le creusement d'une fosse, l'épandage de matériaux sableux et les clôtures dégradées jusqu'à 2 km de la brèche permettent d'évaluer l'intensité de l'évènement.



Photographie 13 : Rupture de la digue de l'Agly, sur la commune de Pia en mars 2013

L'exemple de la rupture de digue de l'Agly illustre toute la difficulté de réaliser une cartographie hydrogéomorphologique dans un contexte de lit en toit. La définition des zones inondables revient à représenter la limite extrême d'une onde de crue consécutive à une rupture de digue. Dans cette configuration, la totalité des zones inondables ne peut pas être touché lors d'un même évènement. Dans un tel contexte, une partie de la spatialisation des zones inondables incombe au contrôle anthropique des débordements, ainsi qu'à l'entretien des digues. Il devient compliqué de détacher totalement le fonctionnement des lits en toit, de l'impact des activités anthropiques sur les inondations.

4.1.2 Le recalibrage de la Meurthe

Les services de l'État estiment que la cartographie hydrogéomorphologique peut être sujette à caution dans les portions urbaines (chapitre 2). L'exemple des expérimentations menées sur la Meurthe et en particulier dans la traversée urbaine de Nancy apportent quelques précisions sur cette problématique.

Le paradigme de la lutte contre l'aléa inondation a aujourd'hui des impacts très visibles sur l'aspect des cours d'eau. Ils sont endigués ou recalibrés dans l'optique de protéger les enjeux concernés par les inondations. La présence de digues ne remet pas en cause la validité d'une cartographie hydrogéomorphologique. Ces ouvrages permettent de limiter les débordements pour les crues fréquentes à moyennes, mais ne présentent pas toujours des garanties contre les crues extrêmes

(Gendreau *et al.*, 2003). La rupture d'une digue reste possible, légitimant à cette occasion la cartographie hydrogéomorphologique. En revanche, le recalibrage du lit mineur demeure une source réelle d'incertitudes pour le géomorphologue. Cette volonté de « faire passer » une crue donnée dans le lit mineur et d'empêcher tout débordement entraîne évidemment des incertitudes quant à l'inondabilité du lit majeur.

Le cas de la Meurthe à Nancy est révélateur des questionnements soulevés par le recalibrage d'un lit mineur. Ce cours d'eau possède une morphologie naturelle où le lit mineur est séparé du lit majeur par un talus de près d'un mètre de haut (Photographie 14). Cette configuration entraîne facilement des débordements sur les portions du lit majeur qui bordent le lit mineur.



Photographie 14 : Aspect « naturel » de la Meurthe, en amont de Nancy

La crue de référence de 1947 a causé des dégâts humains et matériels élevés à la ville de Nancy (Lang *et al.*, 2013; Nicod, 1949). Pour parer au retour d'un événement similaire, le recalibrage du lit mineur est la solution retenue. Au niveau de la traversée urbaine de Nancy, le chenal de la Meurthe est approfondi et élargi de plusieurs mètres. La différence d'altitude entre le lit mineur et majeur marque la volonté affirmée des autorités de contenir les éventuels débordements de la Meurthe (Photographie 15).



Photographie 15 : La Meurthe recalibrée, dans la traversée urbaine de Nancy

L'identification de la zone inondable de la Meurthe ne souffre pas de beaucoup d'incertitudes du point de vue de la limite entre le lit majeur et l'encaissant (Photographie 16). La crue de 1947 a rempli entièrement le lit majeur. La légitimation de la cartographie hydrogéomorphologique par la crue historique peut cependant être remise en cause. Tel qu'illustré précédemment, le lit mineur de la Meurthe a fait l'objet de grands travaux qui visent précisément à enrayer tout retour d'un événement de type 1947. Ajoutons à cette constatation le fait que le lit majeur largement urbanisé de Nancy ne présente pas les modalités propices à un écoulement libre des eaux de crue. Notre propos peut être nuancé par la constatation que la crue de 1947 a effectivement rempli le lit majeur, alors que le degré d'urbanisation était sensiblement le même.



Photographie 16 : Contact entre le lit majeur de la Meurthe et une terrasse alluviale à Nancy

L'anthropisation de la plaine alluviale et en particulier le recalibrage du lit mineur peut donc être un facteur d'incertitude pour une cartographie hydrogéomorphologique. La zone inondable représentée peut sembler « hydrauliquement » irréaliste au vu des aménagements réalisés.

4.1.3 Les héritages de l'Holocène

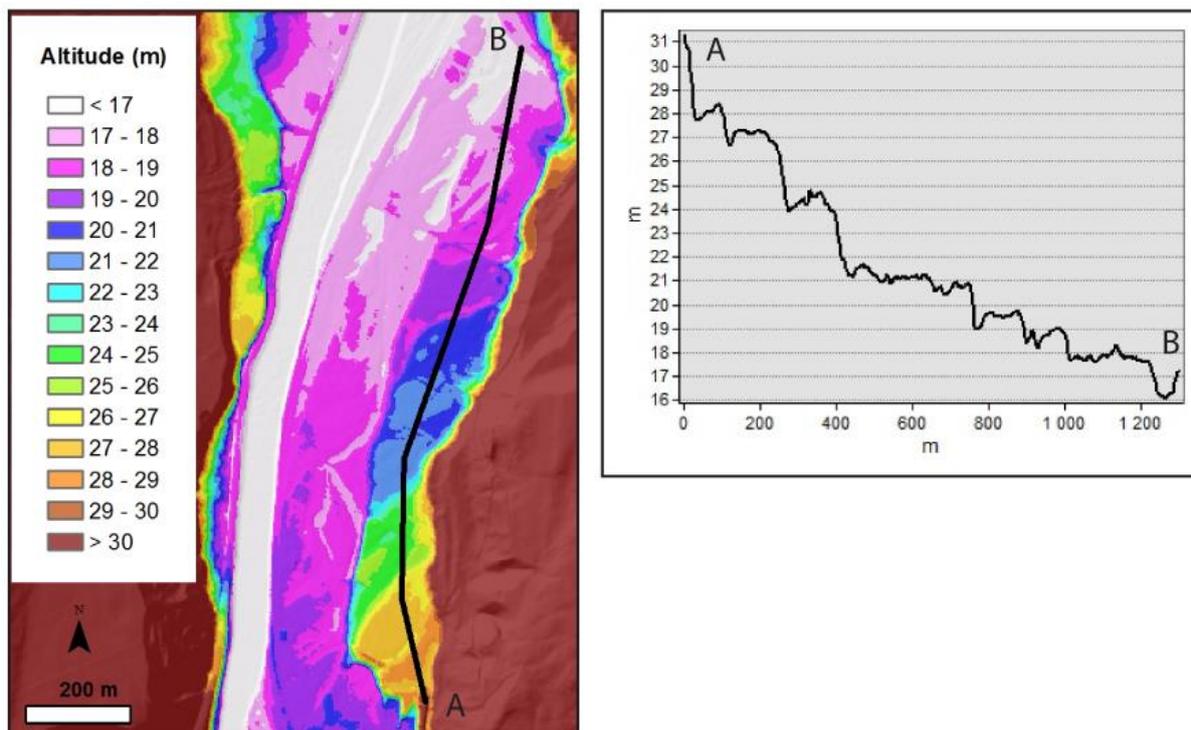
La validité d'une interprétation hydrogéomorphologique repose sur une hypothèse. Le fonctionnement du système fluvial qui a mis en place le lit majeur est considéré stable durant l'Holocène, depuis la fin de la dernière période glaciaire. Mais cette hypothèse peut être mise en cause par exemple pour le cas de la rivière Matane.

Les déformations néotectoniques correspondent à des mouvements de la croûte terrestre qui se déroulent durant le Quaternaire (Foucault et Raoult, 2003). Parmi ces déformations se trouve la glacio-isostasie. Elle correspond au relèvement de la croûte terrestre consécutive au retrait des inlandsis ayant disparu depuis la dernière glaciation (Coque, 2002). Cette caractéristique est évoquée lors de la réalisation de la cartographie hydrogéomorphologique de la rivière Matane (Chapitre 3).

Sur la rivière Matane, le contact entre l'encaissant et la zone inondable est visible de manière très nette. Pourtant dans certains secteurs, des doutes persistent. Le premier facteur d'incertitude demeure la profusion de niveaux de terrasses alluviales construites durant l'Holocène (Marchand *et al.*, 2013a). Selon la vision des géomorphologues français, une terrasse alluviale est un héritage de l'hydrodynamisme des dernières glaciations. Elle constitue donc une surface non inondable (Ballais *et al.*, 2011; Coque, 2002; Masson *et al.*, 1996). Mais la glacio-isostasie estompe la frontière entre la zone inondable et les terrasses alluviales.

La remontée progressive de la croûte terrestre produit par endroit une succession de niveaux de terrasses alluviales par enfoncement progressif du cours d'eau (Figure 100). Cet enfoncement progressif rend non inondable des portions de lit majeur situées jusqu'à 10 m au-dessus du lit majeur, devenant ainsi des « terrasses holocène ». En revanche pour des portions externes du lit majeur, leur inondabilité est incertaine.

La cartographie hydrogéomorphologique réalisée, ainsi que le MNZI qui en découlent confirment que la zone inondable s'étend approximativement jusqu'à l'altitude de 19 m (Figure 100). Il n'en demeure pas moins que la succession de terrasses alluviales est une source de confusion pour le géomorphologue. Elle nécessite un examen approfondi de la topographie.



Source Lidar : MSP

Figure 100 : Cartographie et profil topographique d'une succession de terrasses alluviales de la rivière Matane

D'un point de vue transversal, le dégradé de niveaux de terrasses alluviales que présente la Matane est sources d'incertitudes (Photographie 17). Les ruptures de pente qui s'entremêlent avec des dépressions apparentées à des paléo chenaux de crue participent également à l'incertitude. Notons que sur la photographie présentée, la prairie qui relie la zone inondable et les terrasses accentue la difficulté d'analyse.



Photographie 17 : Transition entre le lit majeur, plusieurs niveaux de terrasses alluviales et le versant, autour de la rivière Matane (Québec)

Cependant, après une étude minutieuse de la topographie par le biais du MNT LiDAR, la distinction entre lit majeur et terrasses s'affirme. L'identification de la limite de zone inondable est possible, mais un doute subsiste. Ce doute est alimenté par la nature de ces « terrasses Holocène » dont la simple évocation apparaît comme un antagonisme profond pour quiconque pratique la cartographie hydrogéomorphologique en France. Ces terrasses sont la preuve que l'inondabilité de toutes les formations alluviales est en perpétuelle évolution. En conséquence le caractère inondable du niveau 3 de la cartographie hydrogéomorphologique peut être sujet à caution. Cette incertitude est renforcée par une absence de retour d'expérience prouvant le caractère inondable d'un niveau 3. La mise en valeur des informations historiques constitue la voie la plus sûre pour prodiguer une légitimité à la cartographie hydrogéomorphologique dans un milieu particulier.

Les effets de la glacio-isostasie sur l'interprétation hydrogéomorphologique souffrent de quelques limites. Tout d'abord la réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques dans ce contexte est très récente (Olsen *et al.*, 2011) au regard des premières expérimentations menées en France (Masson, 1983). Ensuite, nos observations sont réalisées sur un nombre de sites limités. La diminution de ces incertitudes peut évoluer avec le développement de la cartographie hydrogéomorphologique au Québec qui demandera des études plus approfondies. La prise en compte de cette problématique peut être effective grâce à une approche par modelés de plaines alluviales (Demers *et al.*, 2014). La typologie des modelés de plaines permet d'admettre l'évolution perpétuelle de la plaine alluviale active à travers la distinction de modelés d'érosion, de sédimentation, stables et glaciels. Cette approche rompt avec l'idée d'une plaine alluviale figée que peut parfois proposer l'approche hydrogéomorphologique. La glacio-isostasie constitue un paramètre supplémentaire qui participe à l'incertitude liée à l'interprétation hydrogéomorphologique.

4.2 Imprécisions et incertitudes dans la cartographie hydrogéomorphologique

Les concepts d'imprécision et d'incertitude se trouvent au cœur de ce chapitre. Le croisement de ces deux concepts produit quatre situations théoriques (Figure 101). Dans le cas où une cartographie est certaine et imprécise, plusieurs personnes produiront les mêmes limites de zones inondables. Si l'interprétation reste certaine, mais perd en précision, les cartographies produites suivront les limites de zones inondables, mais présenteront des erreurs ponctuelles. Le cas d'une interprétation incertaine mais précise entraîne des différences nettes entre plusieurs limites de zones inondables potentielles. Enfin une cartographie imprécise et incertaine montre des divergences tant sur la localisation générale des zones inondables que dans le détail.

Afin d'établir un niveau de confiance envers une cartographie hydrogéomorphologique, nous proposons de détailler les différents facteurs qui influencent ses imprécisions et ses incertitudes.

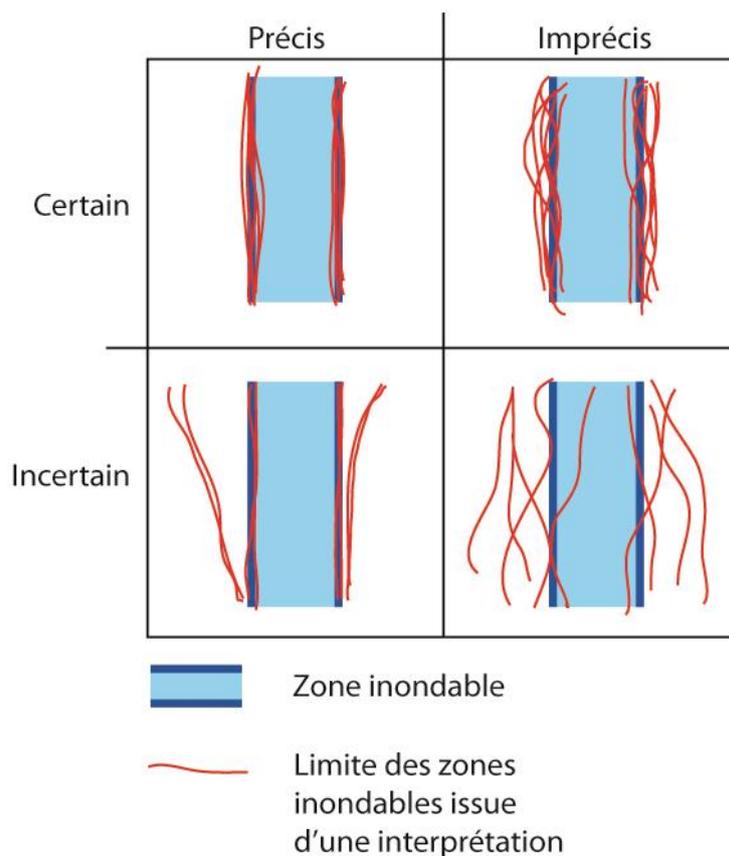


Figure 101 : Application des concepts d'imprécision et d'incertitude à la cartographie des zones inondables

4.2.1 Les facteurs d'imprécision

Dans le cadre d'une cartographie hydrogéomorphologique, l'imprécision réfère directement à la netteté du contact entre la zone inondable et l'encaissant. Une zone est considérée comme inondable surtout parce que l'encaissant ne l'est pas. Dès lors qu'il devient difficile de différencier précisément l'encaissant du lit majeur, tant sur le plan topographique que sédimentologique, il se produit nécessairement des imprécisions. Ces imprécisions sont directement liées au type de plaine alluviale et aux apports sédimentaires provenant de l'encaissant.

4.2.1.1 Type de plaine alluviale

Nanson et Croke (1992) identifient trois types de plaines alluviales, en fonction de leur puissance spécifique exprimée en $W.m^{-2}$. Ils distinguent les plaines à forte énergie ($300 - 1000 W.m^{-2}$), à moyenne énergie ($10 - 300 W.m^{-2}$) et à faible énergie ($< 10 W.m^{-2}$). Le cas des basses plaines évoquées précédemment correspond à une plaine à faible énergie. Ces plaines sont notamment caractérisées par une surreprésentation des processus de dépôt qui entraîne une aggradation du lit mineur. Progressivement, il n'y a plus de distinction possible entre l'encaissant composé lui-même de

formations alluviales anciennes et le lit majeur. Par ailleurs, la netteté des formes observables dans une plaine alluviale reste largement tributaire de la variabilité des écoulements entre les étiages et les crues (Delorme-Laurent, 2007)

Au contraire, les plaines à haute et moyenne énergie présentent des processus d'érosion très visibles. La distinction entre l'encaissant et le lit majeur reste nette. Il convient de noter que les cônes alluviaux peuvent constituer localement des facteurs d'imprécision, du fait de leur topographie bombée qui produit, en plus réduit, les mêmes effets que les lits en toit.

4.2.1.2 Apports de versant

La cartographie hydrogéomorphologique dans des plaines de faible énergie constitue le facteur d'imprécision le plus prégnant. Mais il peut également survenir des difficultés de localisation de la limite de zone inondable pour des plaines de moyenne, voire de forte énergie. Le type de substrat influence l'aspect du talus externe de la zone inondable (Figure 102). Depuis les roches cohérentes (calcaire, granites, certaines roches métamorphiques...) jusqu'aux substrats composés de marne ou d'argile, la distinction entre le lit majeur et le versant tend à s'estomper.

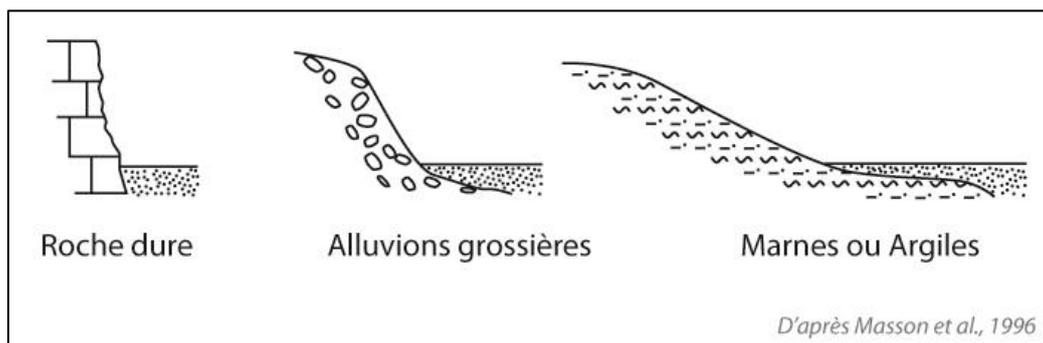


Figure 102 : Différenciation du talus externe de la zone inondable en fonction du substrat

4.2.2 Les facteurs d'incertitude

Les facteurs d'incertitudes renvoient directement à l'évolution de la plaine alluviale elle-même. Il y a incertitude lorsque les formes visibles sur le terrain semblent déconnectées des processus d'inondation actuels. Ces facteurs peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

Sur le plan naturel, l'évolution rapide du profil en long d'un cours d'eau à la faveur de phénomènes de néotectonique tels que la glacio-isostasie constitue un facteur élevé d'incertitude. Il en résulte un étagement de formations alluviales au sein desquelles il devient hasardeux de distinguer les terrasses du lit majeur. Au-delà de la glacio-isostasie, des mouvements tectoniques intenses peuvent également provoquer une incision du lit mineur et fossiliser des portions de lit majeur (Lavé et Avouac, 2001)

Les sociétés humaines peuvent directement intervenir sur la géométrie du lit mineur dans le but de minimiser l'étendue des crues futures. L'exemple de la Meurthe illustre cette problématique Cf.

paragraphe 4.1.2). Tout remblai surfacique en lit majeur constitue également un facteur d'incertitude sur l'inondabilité de la surface concernée. Un remblai d'infrastructure peut également augmenter le risque d'inondation en créant par exemple des surcotes de crue en amont d'un ouvrage et ainsi provoquer l'inondation des zones pourtant identifiées comme non inondables.

Des incertitudes peuvent aussi provenir d'actions involontaires des sociétés humaines. Au-delà de l'anthropisation de la plaine alluviale, les modifications apportées sur l'occupation du sol du bassin versant peuvent être source d'incertitudes. Certaines pratiques agricoles et l'imperméabilisation des sols favorisent l'accélération et la concentration des écoulements. Elles peuvent ainsi modifier le régime hydrologique d'un cours d'eau (Ballais *et al.*, 2011; Chamoux, 2003; Masson *et al.*, 1996).

L'incision des cours d'eau consécutive aux extractions de granulats constitue une problématique abordée par les géomorphologues (Bravard, 1994; Landon *et al.*, 1998). Ces incisions peuvent atteindre par exemple 3 mètres dans le bassin du Buëch (Gautier, 1994) et 12 mètres dans le bassin de l'Arve (Peiry et Bravard, 1989). Au-delà des désordres tels que les dégâts engendrés aux ouvrages d'art ou encore l'épuisement des nappes phréatiques, l'incision du lit mineur est un facteur d'incertitude. Les conséquences sont du même type que pour le recalibrage d'un cours d'eau. Il n'est plus certain que les portions externes du lit majeur soient toujours inondables.

4.2.3 Le type des données topographiques

L'apparition des MNT LiDAR permet de réduire les imprécisions et les incertitudes, par rapport à la photo-interprétation.

La précision de la cartographie est accrue pour plusieurs raisons. Tout d'abord l'interprétation est réalisée directement sur le MNT. Il n'y a plus d'erreurs liées à la recherche de correspondances entre la photographie aérienne et le fond topographique. Ensuite les formes sont précisément identifiables et il devient surtout possible de valider les limites de zones inondables grâce à des variables quantitatives telles que la pente transversale. Cependant, il restera toujours des imprécisions inhérentes à la qualité du MNT ou à la précision de la cartographie liée à la vitesse de réalisation.

L'utilisation de MNT LiDAR entraîne une réduction des incertitudes par rapport à la photo-interprétation. La possibilité de tracer des profils en travers et de mesurer précisément l'altitude de différents niveaux topographiques constitue un atout. Mais le principal changement reste la possibilité de réfléchir en altitudes absolues et non en altitudes relatives comme c'est le cas pour la photo-interprétation.

4.3 Le niveau de confiance : une combinaison des imprécisions et des incertitudes

La réalisation d'une cartographie de zones inondables est source de nombreux questionnements. Ces interrogations varient d'un cours d'eau à l'autre. Avec la notion de niveau de confiance, nous

combinons les incertitudes et les imprécisions, pour aboutir à un dégradé des configurations présentant un niveau de confiance faible à des situations plus optimales (Figure 103).

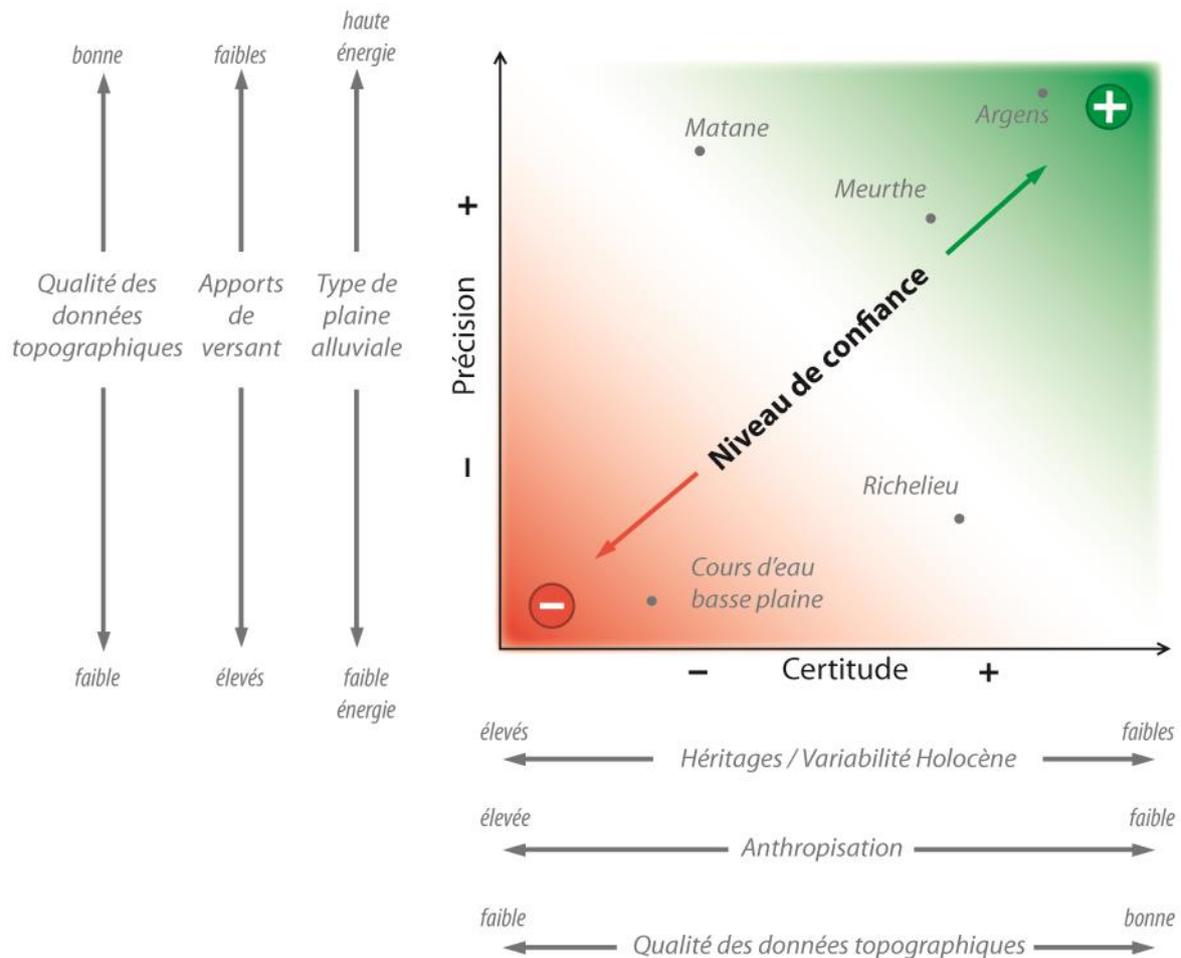


Figure 103 : Schématisation des paramètres influençant le niveau de confiance en une cartographie hydrogéomorphologique

4.3.1 Comparaison de différents sites

Afin de concrétiser ce niveau de confiance nous proposons de comparer les différents sites étudiés dans le cadre de cette thèse. En premier lieu, nous observons une opposition franche entre le site de l'Argens et les cours d'eau de basses plaines. La délimitation des zones inondables de l'Argens présente une bonne précision avec une plaine alluviale de moyenne énergie et des versants qui se détachent clairement du lit majeur. L'anthropisation se limite à une urbanisation du lit majeur et la géométrie du lit mineur semble stable. Le faible niveau de confiance accordé à la cartographie des basses plaines reflète avant tout leur faible énergie. Ensuite, le fonctionnement de ces espaces reste largement marqué par des siècles de façonnement humain. La composition argileuse de l'encaissant

rend imprécis la localisation des zones inondables. Enfin l'absence de MNT LiDAR est préjudiciable à la fois pour la précision et pour l'incertitude.

La Meurthe présente un niveau de confiance correcte, mais inférieur à l'Argens. Cela provient du recalibrage du lit mineur, d'une plaine alluviale de plus faible énergie, mais aussi par endroits d'une lithologie composée d'argiles et qui entraînent du colluvionnement.

Les exemples de la Richelieu et de la Matane montrent tout l'intérêt de distinguer les problèmes d'imprécisions et d'incertitudes. Ces deux cours d'eau comportent un niveau de confiance équivalent, mais des caractéristiques très différentes. La rivière Matane présente une cartographie précise, mais de fortes incertitudes. Elle est caractérisée selon la classification des plaines alluviales (Nanson et Croke, 1992) par une énergie moyenne (Demers *et al.*, 2014). La lithologie constituée de roches cohérentes rend la question des colluvions inexistante. En revanche l'évolution intense de la plaine alluviale durant l'Holocène, symbolisée par les nombreux niveaux de terrasses, induit de fortes incertitudes. L'interprétation de la rivière Richelieu montre une faible précision, mais peu d'incertitude. Ce cours d'eau présente une plaine à basse énergie, mais la qualité des données topographiques et la relative stabilité de la plaine maintiennent un niveau de confiance moyen.

Notons que sur un même cours d'eau le degré de confiance est susceptible de varier. La transition entre des zones urbaines et rurales, le changement de lithologie ou de l'énergie des plaines en sont responsables.

4.3.2 Analyse du niveau de confiance à l'échelle d'un bassin versant

La finalité de la revue de tous les paramètres d'incertitude et d'imprécision est d'anticiper les problèmes rencontrés lors de l'interprétation. L'analyse à l'échelle d'un bassin versant permet de spatialiser le niveau de confiance (Figure 104). Dans cette figure, nous représentons en premier lieu les caractéristiques physiques qui influencent la difficulté d'interprétation hydrogéomorphologique. Cela revient à repérer les zones présentant une lithologie friable, une portion de cours d'eau avec une faible énergie et les secteurs anthropisés. Nous ne retenons pas la variabilité Holocène que nous considérons comme homogène à l'échelle d'un bassin versant. Il en est de même pour la précision des données topographiques.

De manière générale, le niveau de confiance est plus élevé dans les portions amont d'un bassin versant. La partie aval, de plus faible énergie est plus compliquée à interpréter. Une anthropisation accrue dans les portions aval, associée à une lithologie constituée de matériaux fins et friables accentue ce clivage. Pour autant, la présence d'une lithologie friable dans les portions amont d'un bassin versant est possible, tout comme de l'anthropisation ce qui complique localement l'interprétation.

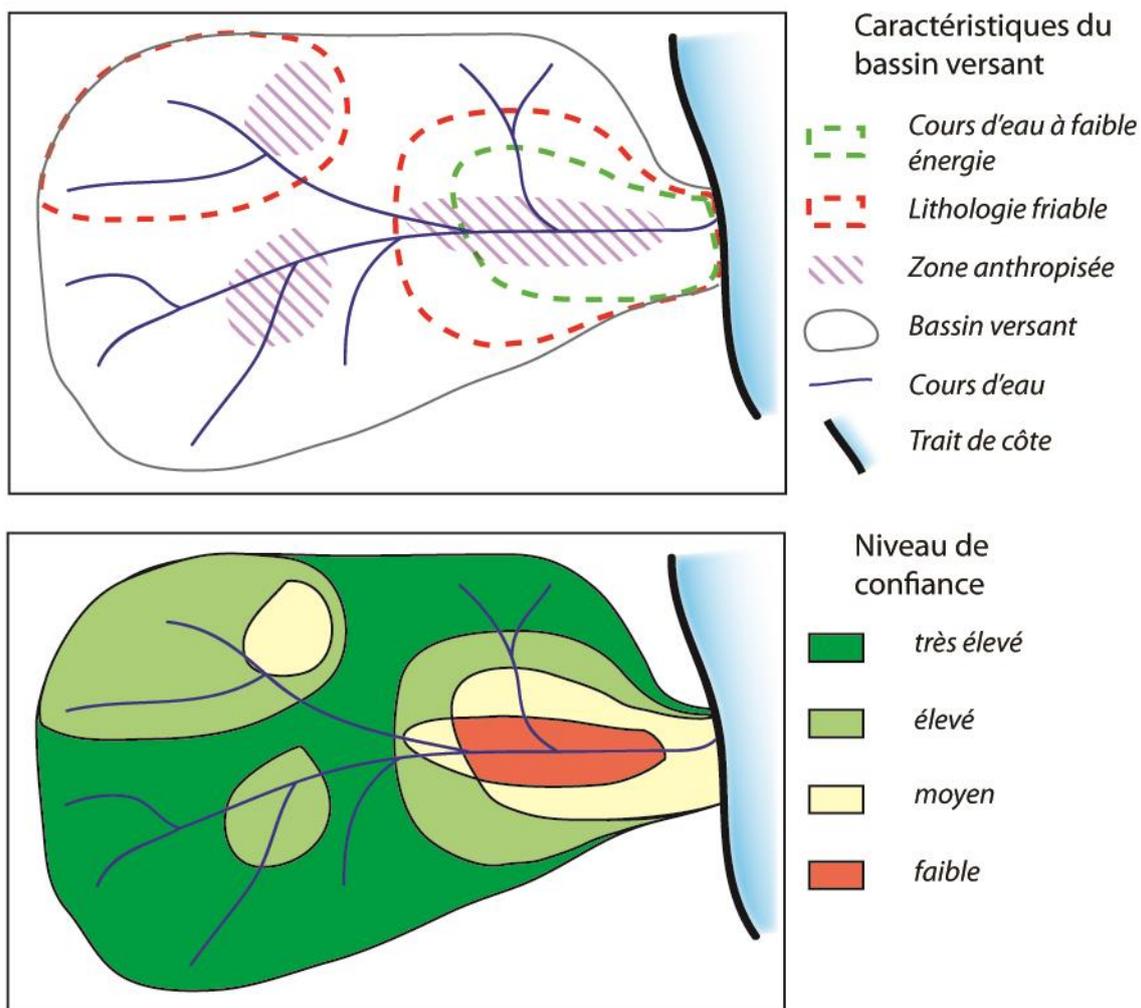


Figure 104 : Cartographie théorique de caractéristiques d'un bassin versant et des niveaux de confiance de l'interprétation hydrogéomorphologique qui en résultent

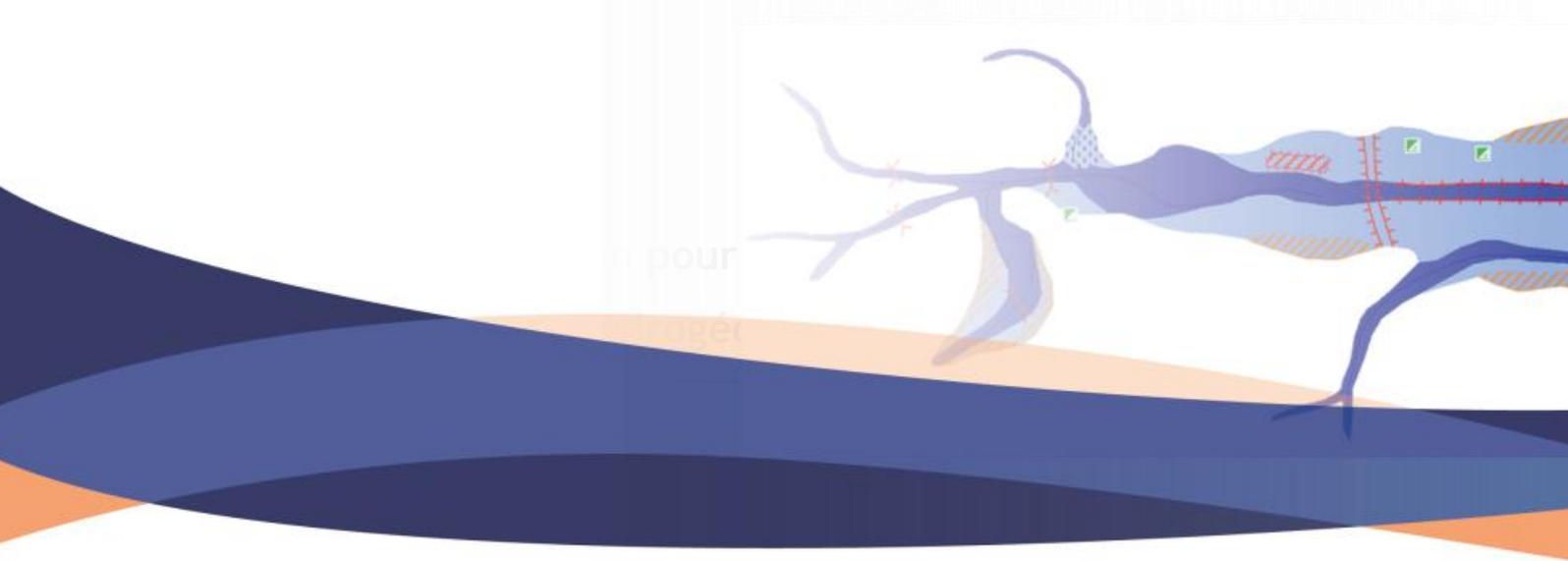
4.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous cherchions à définir les paramètres qui influencent la précision et l'incertitude liées à une cartographie hydrogéomorphologique. Le croisement des incertitudes et des imprécisions influence directement le niveau de confiance accordé à la cartographie. Le type de plaine alluviale et les apports de versants sont directement liés à la netteté de la limite de zone inondable et donc au niveau d'imprécision. Les incertitudes sont influencées par l'évolution rapide du profil en long du cours d'eau, qu'elle soit naturelle, par exemple avec la glacio-isostasie, ou anthropique suite à des extractions de granulats. Le type de données topographiques employé se répercute à la fois sur les incertitudes et les imprécisions.

L'analyse du niveau de confiance de la cartographie hydrogéomorphologique permet de répondre au poncif qui prétend que la cartographie hydrogéomorphologique est plus adaptée aux cours d'eau méditerranéens. Il est vrai que la méthode fut expérimentée dès les années 1980 dans ce milieu. Il demeure également exact que les nombreuses crues des années 1990 et 2000 apportèrent de la

crédibilité à la méthode en milieu méditerranéen. En revanche, il serait extrêmement réducteur de penser que les caractéristiques physiques des cours d'eau situés hors du contexte méditerranéen sont incompatibles avec l'approche. Le niveau de confiance accordé à une cartographie hydrogéomorphologique sera par exemple toujours plus élevé pour toute portion de cours d'eau située dans une zone de transfert, que pour un cours d'eau de basse plaine côtière.

Désormais, la question qui se pose relève de la prise en compte des niveaux de confiance dans la cartographie hydrogéomorphologique. Dans un premier temps, il serait utile de diagnostiquer le niveau de confiance attendu pour un cours d'eau ou pour un bassin versant entier. Cela permettrait d'anticiper des éventuelles difficultés liées à l'interprétation hydrogéomorphologique. Il devient ensuite possible d'intégrer les incertitudes et les imprécisions au sein même d'une cartographie hydrogéomorphologique. La représentation cartographique d'incertitudes constitue un champ d'étude encore peu exploré (Ehlschlaeger *et al.*, 1997; MacEachren, 1992; MacEachren *et al.*, 2005). Dans une perspective de refonte de la légende des AZI hydrogéomorphologiques, leur prise en compte semble incontournable. Elle permettrait tout d'abord d'identifier les lacunes liées au milieu physique en question. Enfin, la cartographie des incertitudes et des imprécisions représente une forme de transparence vis-à-vis du lecteur.



Chapitre 5

Axes de réflexion pour l'évolution de la cartographie
hydrogéomorphologique

La cartographie hydrogéomorphologique, telle qu'elle est pratiquée en France, utilise des méthodes élaborées dans les années 1990. Elle a pour objectif de délimiter les zones inondables grâce à la description des formes qui constituent la plaine alluviale active (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996).

Dans ce chapitre nous cherchons à établir pourquoi la cartographie doit évoluer et quelles formes peuvent prendre ces différentes évolutions. La diversification des rendus cartographiques constitue un processus primordial pour que l'interprétation hydrogéomorphologique s'adapte à différents besoins tels que la communication sur l'aléa inondation ou l'aménagement des territoires. Notre réflexion est orientée dans un premier temps sur la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique. Puis nous évaluerons la pertinence de la légende des AZI hydrogéomorphologiques et proposerons des simplifications nécessaires. Enfin nous étudierons de quelle manière l'approche hydrogéomorphologique peut participer à la définition des partis pris d'aménagement et constituer un atout pour l'aménagement des territoires.

5.1 La simplification des AZI par approche hydrogéomorphologique : vecteur d'adhésion à la méthode ?

Le chapitre 2 soulignait les difficultés de communication émanant de la cartographie hydrogéomorphologique. Ces difficultés sont essentiellement causées par une légende complexe et des termes non compris par le grand public. La réalisation de MNZI est largement motivée par la « Directive Inondation ». Elle a montré que des cartes de hauteurs d'eau produites étaient beaucoup plus efficaces visuellement et augmentaient significativement la compréhension de l'aléa. Il ne serait pas rentable ni scientifiquement pertinent de réaliser des MNZI sur des bassins versants entiers. La réalisation d'AZI représentant des données qualitatives doit rester une priorité pour combiner la rapidité de réalisation et l'efficacité de la communication.

Nous cherchons à établir une légende alternative pour des AZI reposant sur une analyse hydrogéomorphologique. Cette nouvelle légende doit se plier à trois exigences. En premier lieu elle doit permettre de conserver l'atout majeur de la cartographie hydrogéomorphologique, à savoir l'interprétation naturaliste de la plaine alluviale. Deuxièmement, elle doit permettre de communiquer plus facilement autour de l'aléa inondation. Enfin, la cartographie doit être optimisée et pensée comme une donnée géographique utilisée par la suite par des documents d'urbanisme tels que les PPRI.

Afin d'atteindre ces objectifs, trois étapes méthodologiques sont prévues. La première étape vise à évaluer la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique par un public non expert. Dans un second temps, nous identifions les différentes lacunes des AZI hydrogéomorphologiques. Enfin, nous proposons une nouvelle légende illustrée par une cartographie théorique.

5.1.1 Compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique

Nous définissons par compréhension, la capacité d'une personne à comprendre les phénomènes associés aux figurés de la cartographie hydrogéomorphologique. Cette compréhension peut varier en fonction du niveau de connaissance de la personne. Cette analyse de la compréhension s'adresse en partie à un public non expert.

5.1.1.1 Méthodologie d'enquête par questionnaire

Afin d'évaluer la compréhension d'une cartographie hydrogéomorphologique, nous élaborons un questionnaire reposant sur l'aspect visuel des cartographies. Tout comme les questionnaires envoyés aux services techniques de l'Etat, les questionnaires sont envoyés grâce au système de formulaire Google⁸⁵.

Le questionnaire fut lancé le 15 mai 2013 et clos le 20 juin 2013. Un total de 108 répondants est recensé. 56 personnes ont des connaissances en géomorphologie et 52 n'ont jamais vu de cartographie hydrogéomorphologique et n'ont pas de connaissances en géomorphologie.

Le questionnaire est envoyé à des étudiants de l'Université Montpellier 3, ainsi qu'à des personnes n'ayant aucune connaissance en géomorphologie ou dans le risque inondation. Nous cherchons avec cette diversification à vérifier si le niveau de connaissance dans ces domaines influence la compréhension d'une cartographie hydrogéomorphologique. Notre hypothèse a priori est que le contenu de la cartographie hydrogéomorphologique et notamment la présence des unités de l'encaissant est préjudiciable à la compréhension des zones inondables. Nous pensons également que les personnes disposant de connaissances en géomorphologie montreront une meilleure compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique.

Le questionnaire comprend cinq questions. Une première série de trois questions fermées (Oui/Non) vise à définir le profil du répondant. Nous demandons si la personne a déjà réalisé une carte, si elle a suivi une formation en géomorphologie et si elle connaît la cartographie hydrogéomorphologique. Nous choisissons par la suite de simplifier le profil en ne distinguant que deux types de répondant. Tout d'abord les personnes qui ont suivi une formation en géomorphologie et/ou ont connaissance de la cartographie hydrogéomorphologique. Ensuite les personnes qui n'ont jamais vu de cartographie hydrogéomorphologique et qui n'ont pas suivi de formation en géomorphologie.

La quatrième question est associée à une carte issue de l'AZI de l'Aude (EGIS Eau, 2010a). Elle vise à évaluer si les répondants arrivent à localiser la zone inondable à partir d'une cartographie hydrogéomorphologique (Figure 105). La question posée est : « D'après la figure ci-dessus, quel(s) point(s) se trouve(nt) en zone inondable ? C'est une question à choix multiple. Il est possible de sélectionner les neuf points, comme de n'en sélectionner aucun. Les réponses correctes sont les points 1, 2, 6 et 9. La cartographie n'est volontairement pas accompagnée d'un commentaire précisant l'inondabilité ou non de chacune des unités géomorphologiques. Chaque répondant doit se fier à la légende et au contenu de la carte.

⁸⁵ <https://support.google.com/drive/answer/87809?hl=fr>

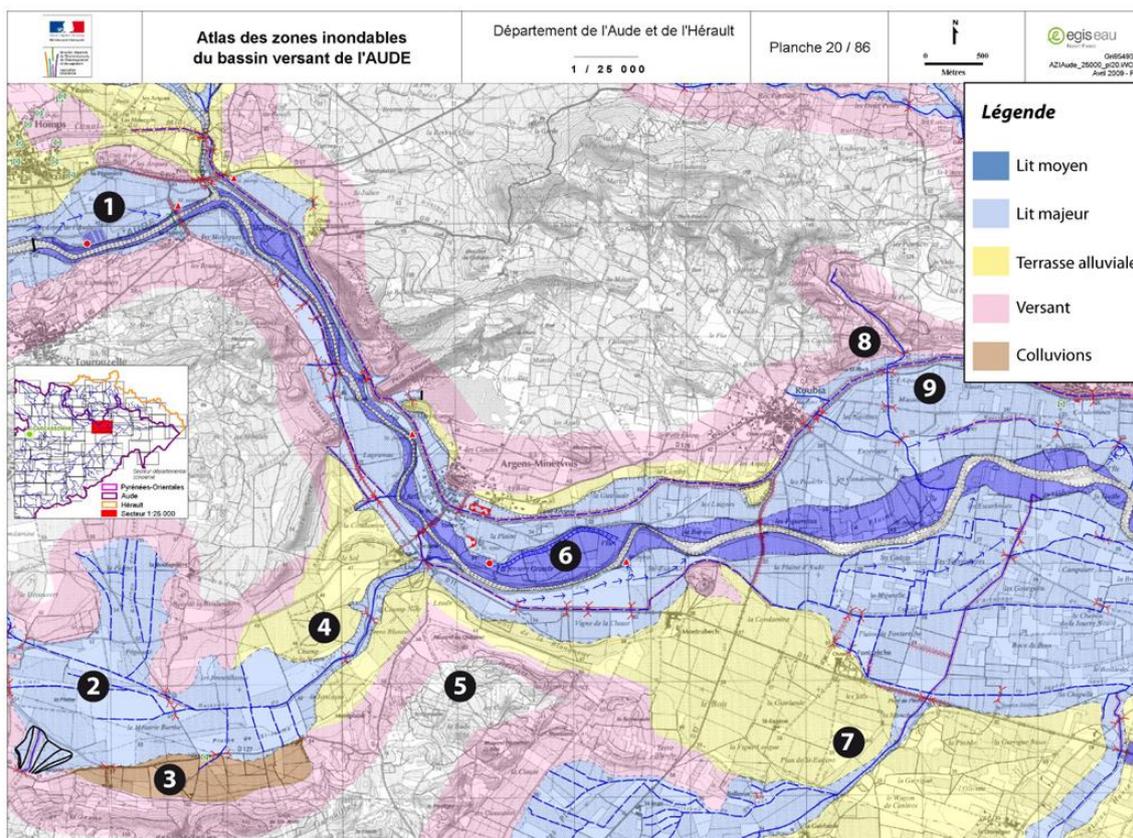


Figure 105 : Extrait de l'AZI de l'Aude (Source DREAL Languedoc-Roussillon) visant à définir le degré de compréhension d'une cartographie hydrogéomorphologique

La dernière question s'intéresse plus particulièrement à la représentation cartographique du lit majeur. Cette unité hydrogéomorphologique est représentée par un figuré zonal bleu clair homogène sur toute son étendue. Pourtant des variations significatives de hauteurs d'eau et de vitesse d'écoulement peuvent s'y produire, en particulier dans les axes d'écoulement ou les dépressions de lit majeur. Nous demandons d'observer la Figure 106 et de répondre par oui ou non à la question : « Pensez-vous que les hauteurs d'eau sont homogènes dans la zone entourée de pointillés rouges ? ».

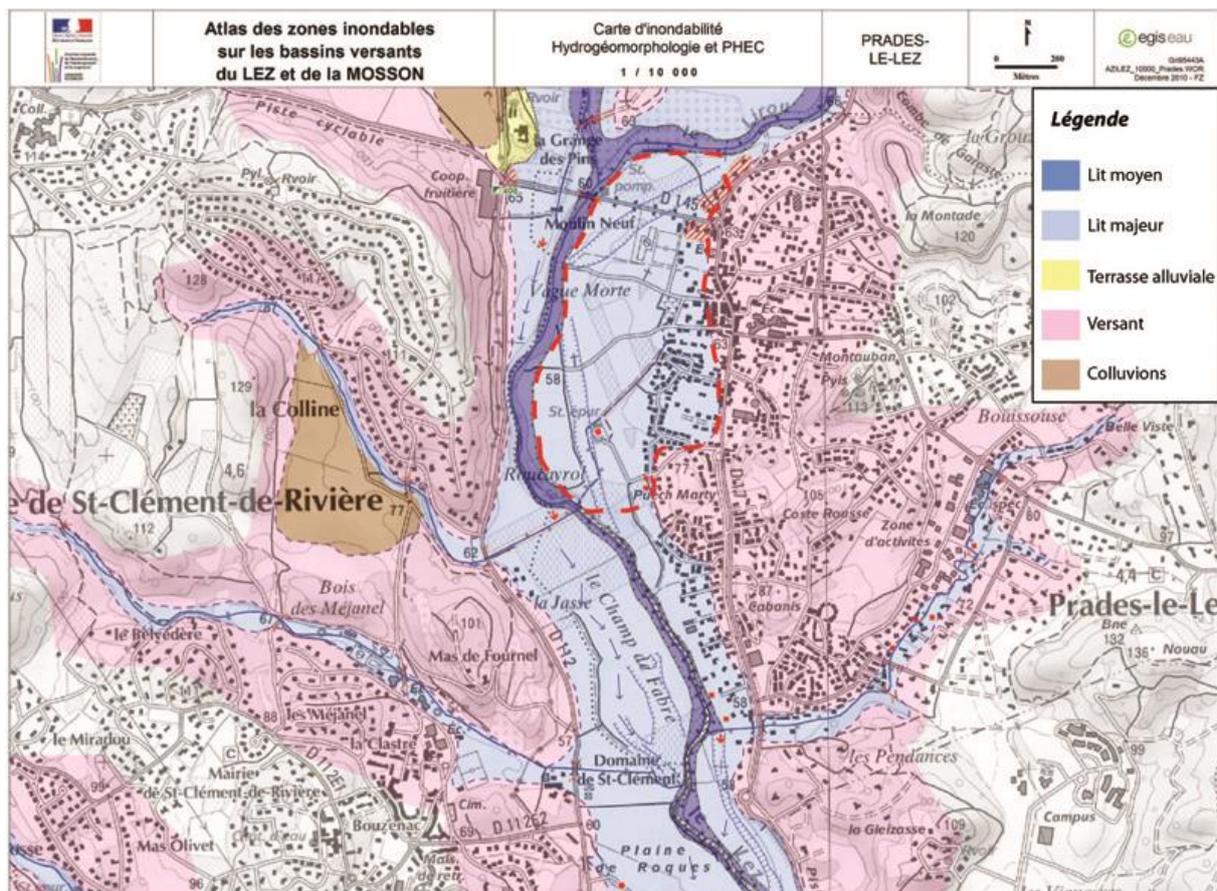


Figure 106 : Extrait de l'AZI Lez-Mosson (Source DREAL Languedoc-Roussillon) visant à définir le degré de compréhension des aléas au sein d'un lit majeur

5.1.1.2 Résultats des questionnaires

La première question vise à vérifier si les répondants parviennent à localiser la zone inondable à partir d'une cartographie hydrogéomorphologique (Figure 105). Le pourcentage de réponses positives pour chaque point apporte des premiers éléments de réponse (Figure 107). Tout d'abord les répondants ont tendance à maximiser l'emprise des zones inondables. Les quatre points présents en lit majeur et moyen sont considérés comme inondables à hauteur de 82 % à 91 % (points 1, 2, 6 et 9). Lorsque les personnes indiquent des zones inondables trop larges, ce sont les terrasses alluviales qui apportent le plus de confusion avec 29 % et 31 % de réponse positive (points 4 et 7). Viennent ensuite les colluvions qui sont considérés comme inondables par 19 % des personnes, les versants par 8 % personnes. Enfin, 2 % des interrogés considèrent le point 5 en dehors de toute zone, comme étant inondable.

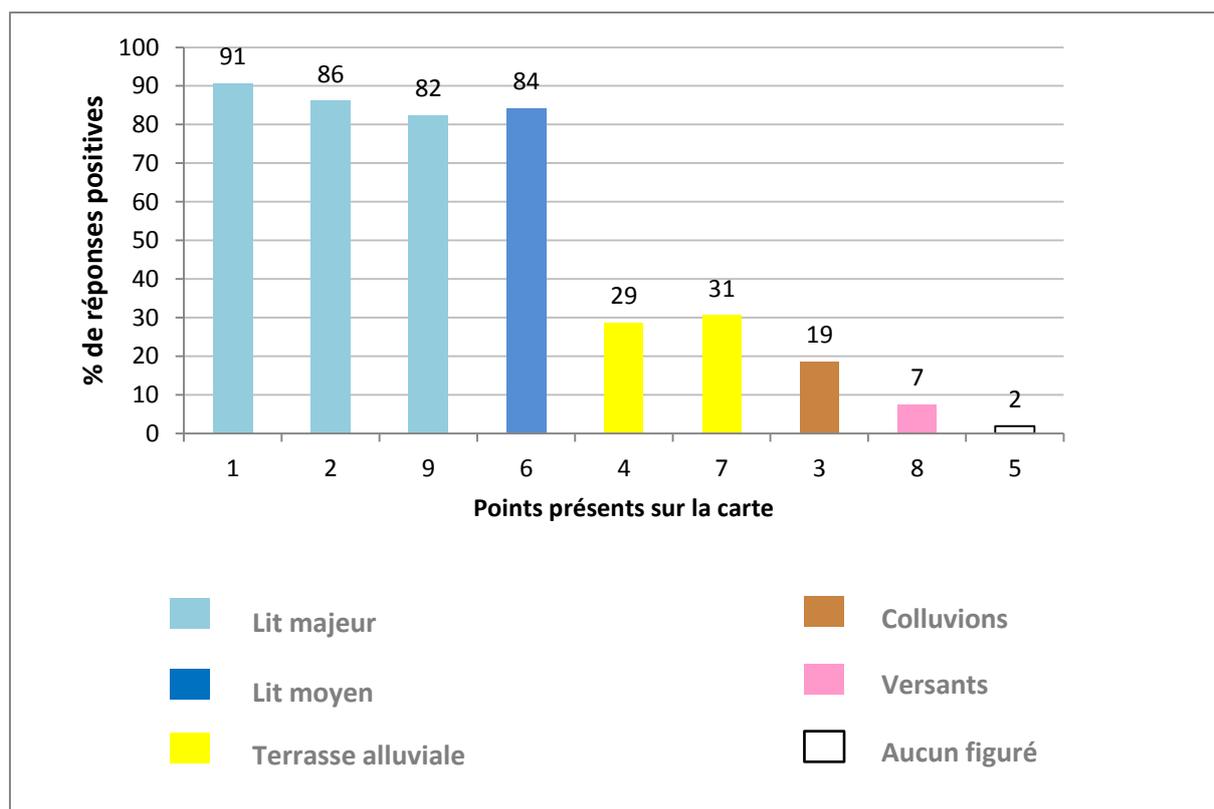


Figure 107 : Pourcentage de réponses pour chaque point

Des différences d'interprétation apparaissent entre les personnes qui ont des connaissances en géomorphologie et celles qui n'en ont pas (Figure 108). Pour six points sur neuf, les répondants qui possèdent des connaissances en géomorphologie ou qui connaissent la méthode hydrogéomorphologique ont plus tendance à considérer un point comme inondable et ce, peu importe que le point soit inondable ou pas. Ils repèrent presque à 100 % la zone inondable constituée des points 1, 2, 6 et 9. En revanche, ils considèrent plus facilement comme inondables les terrasses et les colluvions. Il est opportun de noter que pour le point 9, les personnes ayant des connaissances en géomorphologie répondent moins bien que les autres personnes.

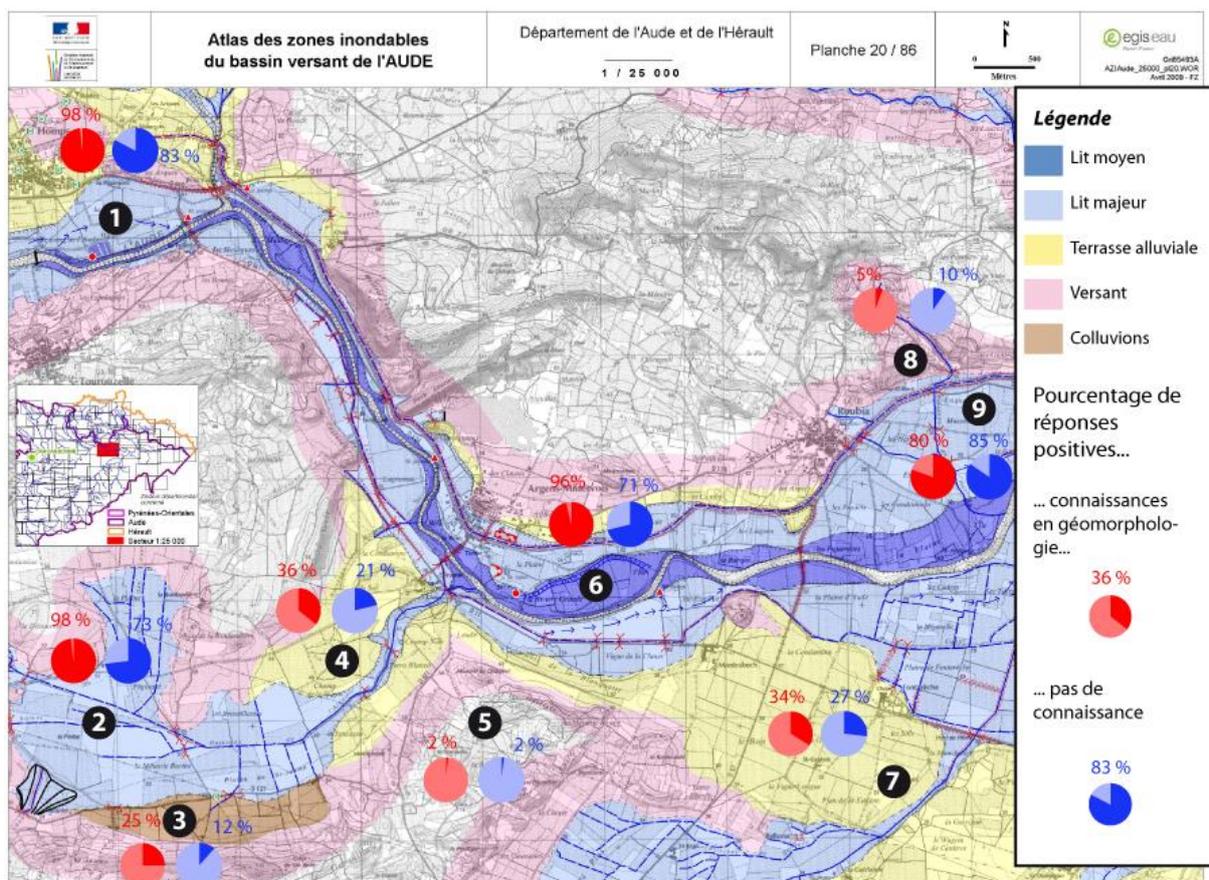


Figure 108 : Pourcentage de réponse pour chaque point en fonction du niveau de connaissance en géomorphologie

Intéressons-nous maintenant aux personnes qui ont parfaitement identifié les points situés en zone inondable (Tableau 11). Une majorité de personnes (56) n'a pas fourni la bonne localisation des zones inondables. On remarque que les personnes qui possèdent des connaissances en géomorphologie localisent bien la zone inondable en majorité (31 correctes et 25 incorrectes). En revanche, les personnes qui n'ont jamais vu de cartographie hydrogéomorphologique et/ou qui ne connaissent pas la géomorphologie présentent une majorité de mauvaises réponses. Le rôle des connaissances en géomorphologie pour la localisation des zones inondables est confirmé par le test des écarts à l'indépendance. Les connaissances en géomorphologie favorisent les bonnes réponses, mais nous admettons que nous attendions des écarts plus marqués.

		Localisation de la zone inondable		
		Correcte	Incorrecte	Total
Connaissance HGM ou géomorphologie	Non	21	31	52
	Oui	31	25	56
	Total	52	56	108
		Écarts à l'indépendance		
		-4,04	4,04	
		4,04	-4,04	

Tableau 11 : Nombre de localisations correctes et incorrectes de la zone inondable, en fonction du niveau de connaissance en géomorphologie

Dans la dernière question (Figure 106), nous demandions si dans une zone entourée de pointillés rouges des hauteurs d'eau seraient homogènes en cas de crue. Une majorité de personnes (81) pense que la zone en question ne présente pas de hauteurs d'eau homogènes (Tableau 12). Les deux tiers des personnes qui n'ont pas de connaissances en géomorphologie précisent que les hauteurs d'eau ne sont pas homogènes contre 85 % des personnes qui ont des connaissances en géomorphologie. Comme dans le cas précédant, les écarts à l'indépendance confirme le rôle positif des connaissances en géomorphologie pour donner une réponse correcte à la réponse.

		Hauteurs d'eau homogènes dans la zone de pointillés rouge ?		
		Non	Oui	Total
Connaissance HGM ou géomorphologie	Non	34	18	52
	Oui	47	9	56
	Total	81	27	108
		Écarts à l'indépendance		
		-5	5	
		5	-5	

Tableau 12 : Réponses liées à l'homogénéité des hauteurs d'eau en lit majeur en fonction des connaissances en géomorphologie

5.1.2 Efficacité de la sémiologie graphique de la cartographie hydrogéomorphologique

Les résultats de l'enquête sont l'occasion de nous questionner sur l'efficacité de la sémiologie graphique de la cartographie hydrogéomorphologique. Bertin, (2005) et Robinson (1976) mettent en avant, à travers le concept de paradigme de la communication, qu'il existe une version optimale pour cartographier un phénomène. En suivant des règles liées aux variables visuelles telles que la taille ou

la couleur des figurés, il est possible de transmettre le plus efficacement possible une information depuis le cartographe jusqu'au lecteur. MacEachren (1995) remet en cause cette vision en proposant plusieurs versions d'un même phénomène rompant ainsi avec l'idée d'une hypothétique carte optimale (Sluter, 2001).

Une des premières distinctions à effectuer en matière de cartographie concerne le mode de communication de la carte. Il est important de distinguer les cartes analytiques (qui se lisent) des cartes synthétiques (qui se regardent). Les cartes analytiques sont généralement composées de plusieurs informations géographiques et doivent être accompagnées d'explications en plus de la légende pour être comprises par le lecteur (ex : cartes géologiques). Elles restituent l'information dans ses détails afin que le lecteur accède à l'information première. Les cartes synthétiques, composées d'une ou deux informations géographiques, permettent de communiquer rapidement une information sans nécessiter d'explications supplémentaires. Comme le démontre Palka (2010), l'augmentation du nombre d'informations géographiques sur une carte entraîne une diminution de sa valeur « communicationnelle ». De plus, la distinction entre les deux types de cartes est fonction de deux paramètres : le niveau de connaissance du lecteur et la correspondance entre le message de la carte et la sémiologie graphique.

Le niveau de connaissance du lecteur est un point central. En effet, une personne n'ayant jamais vu de cartographie hydrogéomorphologique a des difficultés à comprendre à quoi correspondent les unités hydrogéomorphologiques. Elle devra nécessairement se reporter à un guide méthodologique pour la comprendre. Au contraire, une personne qui a l'habitude de ces cartes se contentera de les regarder pour comprendre immédiatement leur contenu. Cela se vérifie avec le questionnaire centré sur la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique. Les répondants qui possèdent des compétences en géomorphologie identifient plus aisément la zone inondable.

Par exemple si l'unité de terrasse alluviale renvoie à une zone non inondable pour une personne connaissant la cartographie hydrogéomorphologique, elle est totalement floue pour le grand public. Le terme « alluvial » peut même induire en erreur des personnes qui disposent de connaissances en géomorphologie.

Un second paramètre entre en jeu pour la bonne compréhension d'une carte, à savoir la correspondance entre le message que l'on souhaite transmettre et ce que transmet réellement la carte. De ce point de vue, le questionnaire apporte une réponse primordiale. Les unités de l'encaissant et en particulier les terrasses alluviales sont source de confusion et considérées à tort comme inondables dans près de 30 % des réponses. Sur ce point, la cartographie hydrogéomorphologique telle que pratiquée en France peut sembler inadaptée. En effet, l'information principale que doit transmettre une cartographie hydrogéomorphologique est la spatialisation des zones inondables. Or, il s'avère que cette cartographie renseigne davantage sur la nature des formations hydrogéomorphologiques que sur leur inondabilité. La symbologie homogène du lit majeur demeure visuellement en décalage avec la réalité d'une inondation pour laquelle des hauteurs d'eau différentes peuvent survenir au sein de cette unité. La simplification de la cartographie hydrogéomorphologique et surtout son recentrage sur la zone inondable permettrait une meilleure communication de l'interprétation des zones inondables réalisée par le géomorphologue.

5.1.3 Les lacunes des AZI par approche hydrogéomorphologique

La réalisation d'un AZI hydrogéomorphologique s'effectue sur un bassin versant entier. Il comporte donc plusieurs centaines de km, voire plus de 1000 km de linéaire. Dans le cadre de contrats BURGEAP, nous avons pu réaliser des AZI sur différents types de cours d'eau. Cette expérience de l'hydrogéomorphologie à très grande échelle constitue un moyen efficace de révéler les problèmes de la méthode. En effet, toutes les incohérences cartographiques ou géomorphologiques se présentent à nous des centaines de fois. Mais en tant que prestataire pour une DREAL, un bureau d'étude se doit de respecter le cahier des charges associé. Ce travail de thèse nous offre l'opportunité d'aborder la cartographie hydrogéomorphologique avec un esprit critique. Nos interprétations reposent sur la réalisation de l'AZI Lez-Mosson et de l'AZI des Etangs côtiers, tous deux réalisés pour le compte de la DREAL Languedoc-Roussillon.

5.1.3.1 Une légende très riche, mais largement sous exploitée

En s'appuyant sur le guide publié par le ministère (MEDD, 2001), la DREAL Languedoc-Roussillon publie en 2010 une notice jointe aux CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières). Cette notice présente dans le détail toutes les tables SIG nécessaires à la réalisation d'un AZI (Annexe 5). Ainsi que toutes les catégories de chaque table. Par exemple, la table « S_ENCA » correspond aux unités de l'encaissant. Elle comprend trois catégories : les colluvions (code 01), les terrasses alluviales, (code 02) et les versants, (code 03). Nous comparons les tables et figurés avec le contenu des AZI auxquels nous avons participé (Lez-Mosson et Etangs côtiers). Les figurés sont optimisés pour une utilisation du logiciel de SIG Mapinfo.

On dénombre en tout 20 tables SIG qui incluent 88 catégories possibles. Chaque catégorie correspond à un type de figuré avec une forme, une couleur et une taille imposées. Dans la pratique, de nombreuses catégories voire tables SIG sont ignorées. Sur les 88 figurés possibles, seul 41 sont réellement utilisés dans un AZI.

Le constat est encore plus marqué en s'attardant sur l'utilisation des AZI hydrogéomorphologiques dans les PPRI. En effet, seule la table « S_INON » est employée pour représenter « l'aléa résiduel ». Nous pouvons même ajouter que seule la limite de zone inondable qui provient de la fusion des trois types de lits (mineur, moyen et majeur) est prise en considération. Tous les figurés linéaires tels que les axes d'écoulement, les chenaux d'écoulement ou encore les dépressions demeurent totalement ignorés.

Réaliser un AZI par approche hydrogéomorphologique, c'est cartographier des figurés dont la majorité ne seront jamais réutilisés par la suite. Ces tables que nous qualifions de « tables d'habillage » ne contiennent pas d'information utile pour les gestionnaires. Citons par exemple les types d'encaissant ou encore les talus qui délimitent les différentes unités hydrogéomorphologiques, qui sont systématiquement ignorés par les gestionnaires du risque inondation, une fois la cartographie terminée.

5.1.3.2 Une carte et non une information géographique

La cartographie hydrogéomorphologique n'est pas pensée comme une information géographique. Toutes les tables SIG sont conçues pour permettre la visualisation de cartes au 1/25 000° ou au 1/10 000°. Si un utilisateur télécharge les données SIG d'un AZI, il doit en premier lieu disposer de la totalité des tables et surtout de leur attribuer le figuré correct. Sans quoi la compréhension de la cartographie sera moins bonne.

Lors de la création de la légende des AZI, les tables SIG n'étaient qu'un moyen de représenter des figurés. La cartographie était le résultat final. Aujourd'hui l'information géographique prend de plus en plus d'importance. Si l'interprétation hydrogéomorphologique veut perdurer, elle doit être conçue pour une utilisation SIG et une visualisation interactive.

Plusieurs figurés sont logiques du point de vue cartographique, mais n'ont pas de sens du point de vue de l'information géographique. Les figurés des cônes torrentiels et des remblais d'infrastructure correspondent à du dessin. Ils constituent un héritage des cartographies hydrogéomorphologiques réalisées manuellement. Plusieurs entités géographiques sont nécessaires pour représenter un cône alluvial ou un remblai (Figure 109). Qui plus est, les cônes alluviaux correspondent à une information zonale, mais sont représentés grâce à des polygones. Des polygones seraient plus adaptés. Le figuré du cône torrentiel reste certes très représentatif de la forme en question, mais il devient difficilement compatible avec un format SIG.

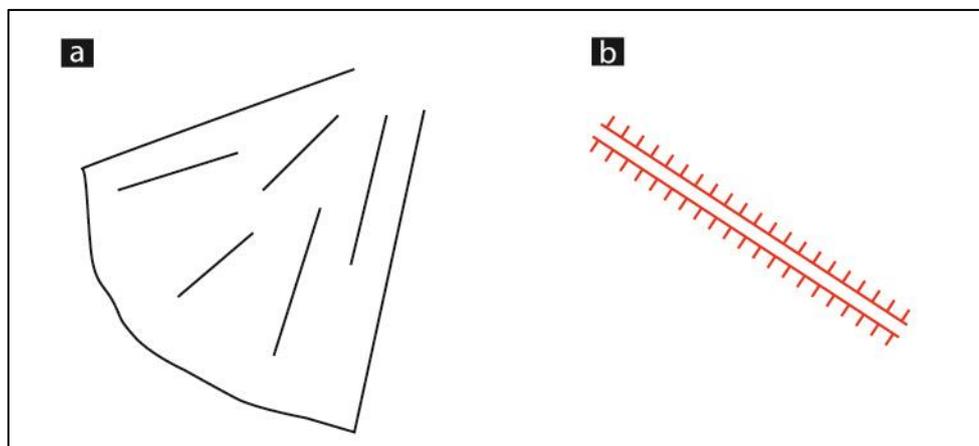


Figure 109 : Les figurés des cônes torrentiels (a) et des remblais d'infrastructure (b)

5.1.3.3 La distinction entre forme et processus : une réalité non prise en compte par la cartographie hydrogéomorphologique

La réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique consiste à représenter des formes. Ces formes telles que le lit moyen ou le lit majeur sont associés à des processus. Le lit majeur demeure plutôt associé à des eaux à faible courant voire stagnantes. Quant au lit moyen il correspond à des écoulements plus dynamiques (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996). Mais cette obligation de représenter uniquement des formes constitue une contrainte pour cartographier efficacement les

processus en jeu. La puissance d'un cours d'eau n'est pas la même suivant sa situation dans le bassin versant (Nanson et Croke, 1992). Certains lits majeurs de cours d'eau peuvent présenter des écoulements très rapides lors d'inondations (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993; Martin, 2010; Masson, 1993).

Prenons l'exemple des cours d'eau situés sur la commune de Montarnaud, dans l'Hérault (Figure 110). Le cours d'eau principal, la Mosson, s'écoule vers le nord-est. Il est caractérisé par le développement d'un lit moyen. En revanche, son affluent de rive droite ne présente pas de lit moyen. Le message que nous transmet la carte est que les écoulements dynamiques en cas de crue se situeront essentiellement près de la Mosson et des autres affluents de rive gauche. Or, ces petits affluents peuvent présenter un comportement torrentiel avec des vitesses d'écoulement élevées. Il y a un décalage entre la réalité d'une inondation et le message transmis par la cartographie hydrogéomorphologique.

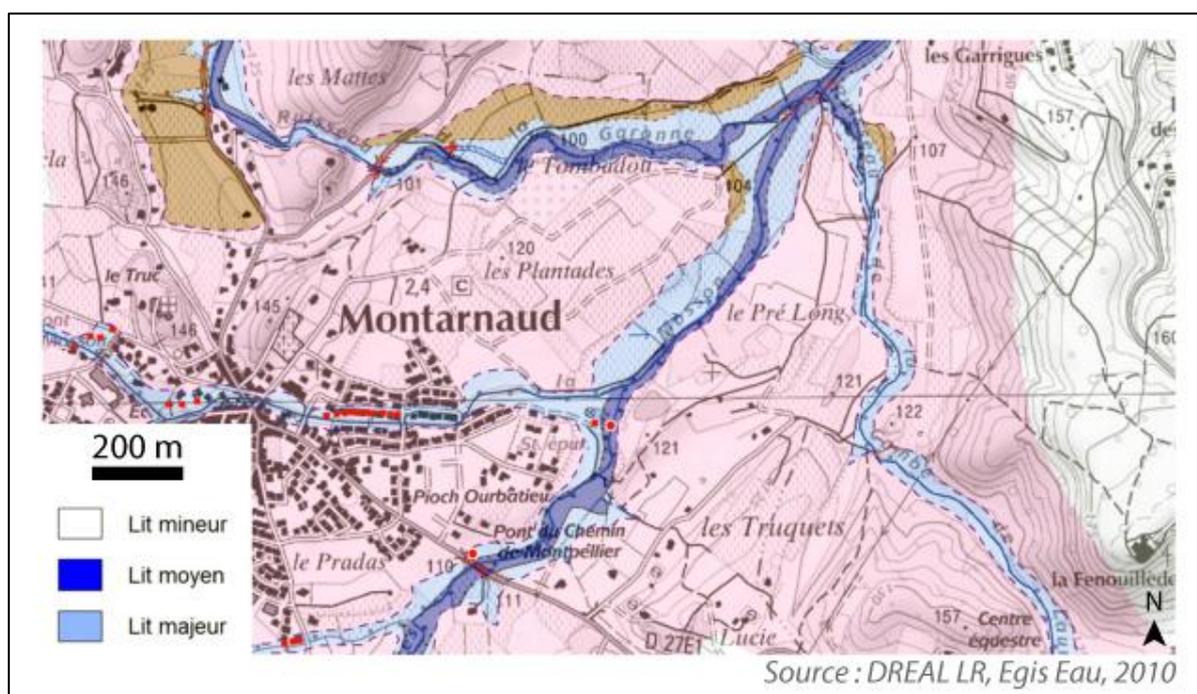


Figure 110 : Extrait de l'AZI Lez-Mosson, commune de Montarnaud

Cette problématique des écoulements en lit majeur est abordée par la cartographie hydrogéomorphologique. Les figurés linéaires des axes d'écoulement et des chenaux d'écoulement visent à spatialiser les secteurs du lit majeur qui peuvent être soumis à des vitesses importantes. Un autre exemple tiré de l'AZI Lez-Mosson illustre les axes et les chenaux d'écoulement (Figure 111). Sur cette carte, le Lez s'écoule en direction du sud. En rive droite, au droit du « Champ de Fabre », se situent des axes d'écoulement et des chenaux d'écoulement (bras de décharge). Ces polygones signifient qu'en cas de crue, des écoulements puissants peuvent s'y produire. Cependant, ces entités linéaires ne possèdent pas la même « puissance visuelle » qu'un polygone, tel que le lit moyen situé à proximité. De plus, si ces figurés linéaires apparaissent bien sur les cartes des AZI, leur diffusion sous format SIG est hypothétique. Le simple fait que cette information soit dissociée de la table « S-INON » lui procure un aspect secondaire.

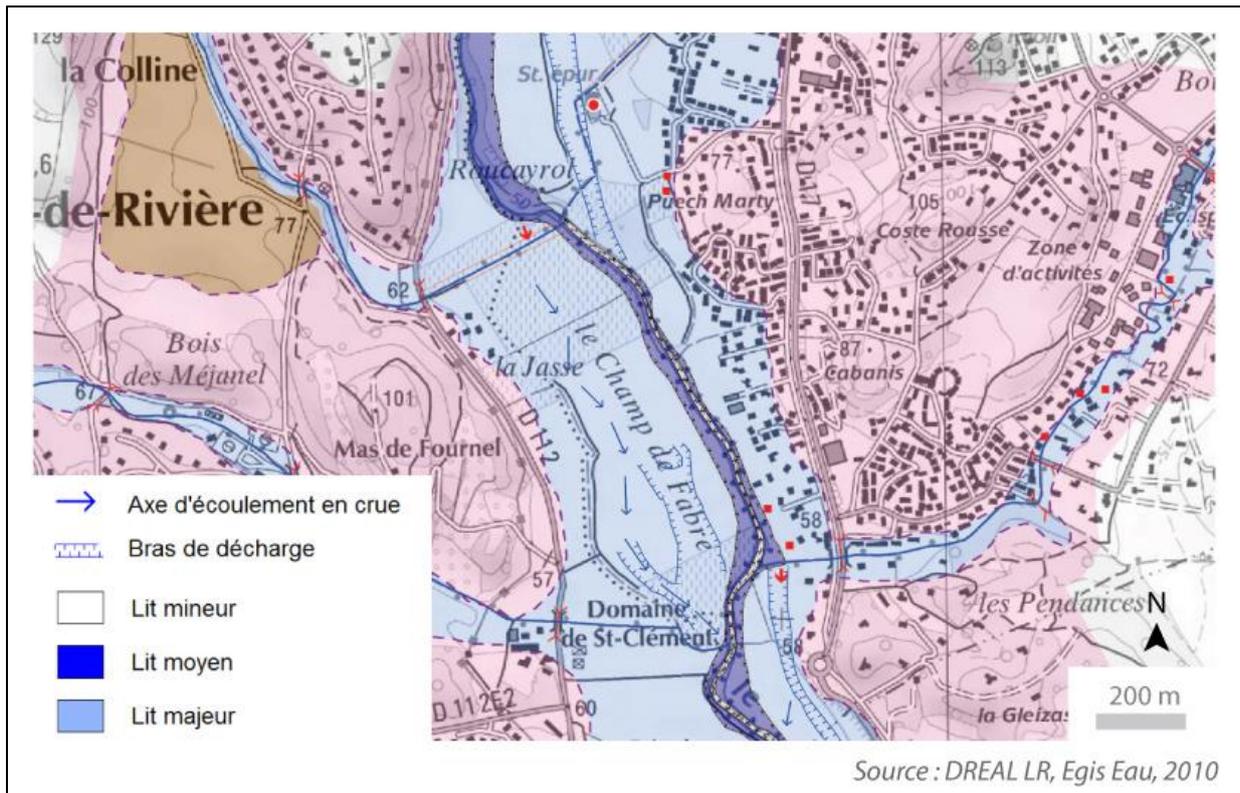


Figure 111: Extrait de l'AZI Lez-Mosson, commune de Saint-Clément-de-Rivière

Dans l'optique de communiquer autour de l'aléa inondation il serait intéressant de s'affranchir de la représentation d'une partie des formes. Ne plus se restreindre à cartographier des formes dont la terminologie n'a de sens que pour les quelques géomorphologues qui réalisent ce type de cartes. En ce sens, seule la limite de zone inondable semble être une forme pertinente à représenter.

5.1.3.4 La représentation des incertitudes et des imprécisions dans les AZI

Comme nous l'abordons dans le chapitre 4, le niveau de confiance dans une interprétation hydrogéomorphologique varie en fonction des incertitudes et des imprécisions inhérentes au cours d'eau étudié. Celles-ci possèdent la caractéristique de pouvoir être spatialisées.

La cartographie des incertitudes est présente dans les AZI par approche hydrogéomorphologique. Ils concernent de manière claire, les incertitudes liées à l'anthropisation de la plaine. Les imprécisions liées au colluvionnement sont présentées de manière plus détournée.

Le cahier des charges SIG d'un AZI comprend la table « S_INOP » (inondation potentielle) qui regroupe plusieurs cas d'incertitudes (DREAL Languedoc-Roussillon, 2010). Cette table SIG comprend 10 catégories (Tableau 13). Les différentes catégories montrent certaines redondances. Entre les « zones de débordement sur encaissant » et les « zones de débordement sur versant » ou « ... sur terrasse ou colluvions », difficile de ne pas s'interroger sur la pertinence de leur coexistence.

Dans la pratique, on se limite à deux ou trois classes. Les débordements liés aux obstacles anthropiques, les zones d'incertitudes, voire les zones de ruissellement (EGIS Eau, 2010a, 2010b).

Code SIG	Description
02	Zone de débordement sur encaissant lié aux obstacles anthropique
03	Zone de débordement sur encaissant lié aux phénomènes de sur-sédimentation
04	Zone de ruissellement pluvial agricole ou urbain en nappe
05	Zone d'incertitudes
06	Zone de débordement sur cône
07	Zone de versant inondable par surcote
08	Zone de débordement sur terrasse ou colluvion
09	Zone de débordement sur versant
10	Zone de débordement prioritaire lors de crues des affluents sur la plaine alluviale du Rhône
11	Ancien étang asséché

Tableau 13 : Les 10 catégories de la table « S_INOP » (source DREAL Languedoc-Roussillon)

Comme son intitulé ne le précise pas, les « zones d'incertitudes » font référence à des secteurs urbains où la limite de zone inondable est peu nette. Elle est en particulier utilisée dans les traversées urbaines où le remaniement de la plaine alluviale rendrait présomptueuse toute localisation précise de la zone inondable. La zone inondable du Lez présente précisément une forme d'incertitudes liées à l'anthropisation intense opérée notamment sur sa rive droite. La zone d'incertitude est à cheval sur le versant et le lit majeur (Figure 112).



Source : DREAL LR, Egis Eau, 2010

Figure 112 : Représentation des incertitudes dans l’AZI Lez-Mosson, à Montpellier (Source : DREAL Languedoc-Roussillon)

La cartographie des incertitudes liées à l’anthropisation fait partie des informations demandées pour un AZI hydrogéomorphologique. Mais les imprécisions liées aux caractéristiques physiques sont absentes. Ou, du moins, elles sont présentes de manière détournée. Lorsque la limite de zone inondable est peu nette, la seule pratique cartographique prévue correspond à une combinaison entre une zone de colluvionnement et un talus peu marqué.

Les principaux guides méthodologiques qui traitent de la cartographie hydrogéomorphologique identifient le colluvionnement comme un facteur d’imprécisions (Ballais *et al.*, 2011; Garry *et al.*, 2002; Masson *et al.*, 1996). Pourtant cette zone d’imprécision liée au colluvionnement ne se retrouve pas dans des AZI hydrogéomorphologiques. Lorsque la jonction entre l’encaissant et le lit majeur est peu nette, il est d’usage d’indiquer une zone de colluvionnement. C’est par exemple le cas du Lez, en amont de Prades-le-Lez (Figure 113). Afin de rendre compte de l’imprécision qui règne autour de ce type de limite de zone inondable, nous indiquons une « limite haute » et une « limite basse » qui représentent les bornes externes de la zone d’imprécision. Notons que les limites représentées sont théoriques, ne reflètent pas une interprétation du terrain et surtout ne correspondent pas à une pratique cartographique des AZI.

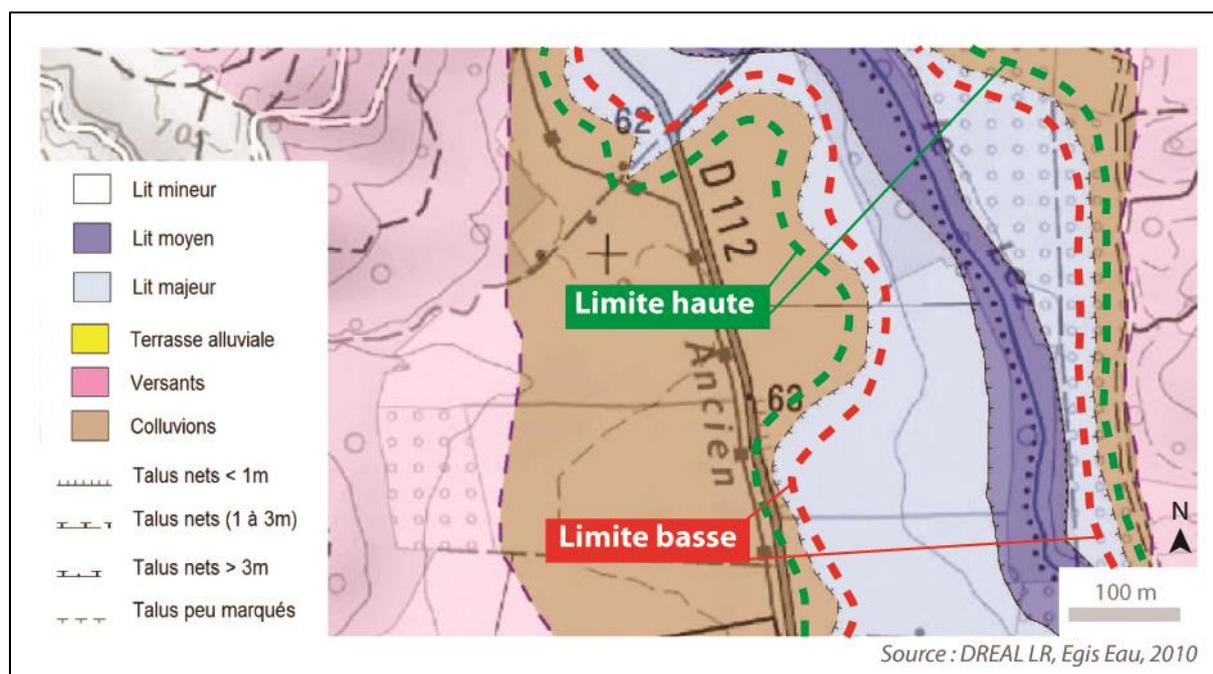


Figure 113 : Représentation du colluvionnement et des « limites hautes » et « limites basses » liées à l'imprécision de la localisation de la zone inondable

Le colluvionnement associé au figuré « talus peu marqués » constitue une forme d'hypocrisie cartographique. Il existe un vrai décalage entre ce que le géomorphologue comprend et ce qu'il cartographie. Pour le lecteur de la carte le contact entre des colluvions et un lit majeur ne correspond pas visuellement à une imprécision. Ce décalage représente une preuve supplémentaire que la cartographie des formes comme principe de base constitue un biais pour la communication autour des zones inondables. L'encaissant, tout comme les talus, rejoignent la cohorte des « tables annexes ». Elles ne sont pas inscrites dans le cœur de l'interprétation hydrogéomorphologique, la table « S_INON ».

5.1.4 Pour des AZI plus simples

Au risque de citer les plus hautes sphères de l'Etat français, un « choc de simplification » appliqué aux AZI hydrogéomorphologiques pourrait s'avérer bénéfique. Cela favoriserait la diffusion de l'approche hydrogéomorphologique tout en permettant d'améliorer la connaissance de l'aléa inondation et de mieux communiquer.

La comparaison entre une approche actuelle des AZI hydrogéomorphologiques (Figure 114a) et une cartographie simplifiée (Figure 114b) permet de visualiser les évolutions envisageables. La légende de la cartographie « classique » reprend les figurés d'un AZI hydrogéomorphologique au 1/25 000° (DREAL Languedoc-Rousillon, 2010; EGIS Eau, 2010a, 2010b). La légende peut être plus détaillée notamment au niveau des types de talus et des formes caractéristiques de l'hydrodynamisme de la zone inondable.

L'AZI simplifié présente plusieurs changements majeurs. Le premier changement reste la diminution du nombre de tables SIG et de catégories. La diminution du nombre de tables est particulièrement sensible au niveau des informations géographiques qui caractérisent la zone inondable. Dans les AZI actuels, elles sont disséminées dans différentes tables SIG de type surfacique, linéaire ou ponctuel. Dans une perspective de simplification, toute l'information nécessaire à la compréhension des zones inondables se situe dans une seule table, constituée uniquement de polygones.

Ce processus de simplification nous amène à supprimer les types de talus, les axes d'écoulement et les cônes torrentiels. Les types de lits (mineur, moyen, majeur) ainsi que le type d'encaissant sont également supprimés. Mais les informations utiles sont intégrées au sein de cette nouvelle table de zones inondables. Cette table comprend quatre catégories. La première catégorie est dite « eaux calmes ». Elle correspond au lit majeur en dehors des axes d'écoulement et des cônes torrentiels. Dans les parties intermédiaires du bassin versant, la zone d'écoulement dynamique (ZED) correspond au lit moyen et aux axes d'écoulement en lit majeur. Pour les cours d'eau amont, la ZED recouvre la quasi-totalité du lit majeur, afin de rendre compte de la puissance des écoulements. Le débordement sur cône torrentiel s'applique comme son nom l'indique sur les cônes torrentiels. Les incertitudes et les imprécisions correspondent également à une catégorie de zone inondable. Ce recentrage sur les processus est déjà amorcé par la cartographie hydrogéomorphologique développée sur la rivière Matane (Demers *et al.*, 2012; Olsen *et al.*, 2011).

Le fait de représenter des processus et non plus des formes conduit à une réflexion précise. Doit-on tenir compte de l'impact des ouvrages anthropiques sur l'écoulement ? Il est en effet délicat de cartographier des zones d'écoulement dynamique si celles-ci sont dans la réalité entrecoupées de nombreux remblais qui modifient les écoulements en cas de crue. Nous choisissons de ne pas prendre en compte les ouvrages anthropiques de manière systématique. En premier lieu parce que nous souhaitons conserver l'interprétation naturaliste propre à l'hydrogéomorphologie. Ensuite la prise en compte des ouvrages restera toujours meilleure avec l'utilisation de modèles hydrauliques. La cartographie hydrogéomorphologique ne doit pas se substituer à ceux-ci. Seule une anthropisation extrême de la plaine alluviale peut être notée au moyen d'une zone d'incertitude. Enfin, pour les cours d'eau de basse plaine qui sont endigués, la zone d'écoulement dynamique s'étend d'une digue à l'autre.

Au final, nous disposons d'une table qui se suffit à elle-même pour comprendre les zones inondables d'un territoire. Cependant, certaines informations géographiques ponctuelles et linéaires restent utiles. Les constructions telles que les remblais, les digues et les ouvrages d'art conservent leur intérêt. La cartographie des PHE (Plus Hautes Eaux) demeure indispensable pour légitimer la cartographie des zones inondables.

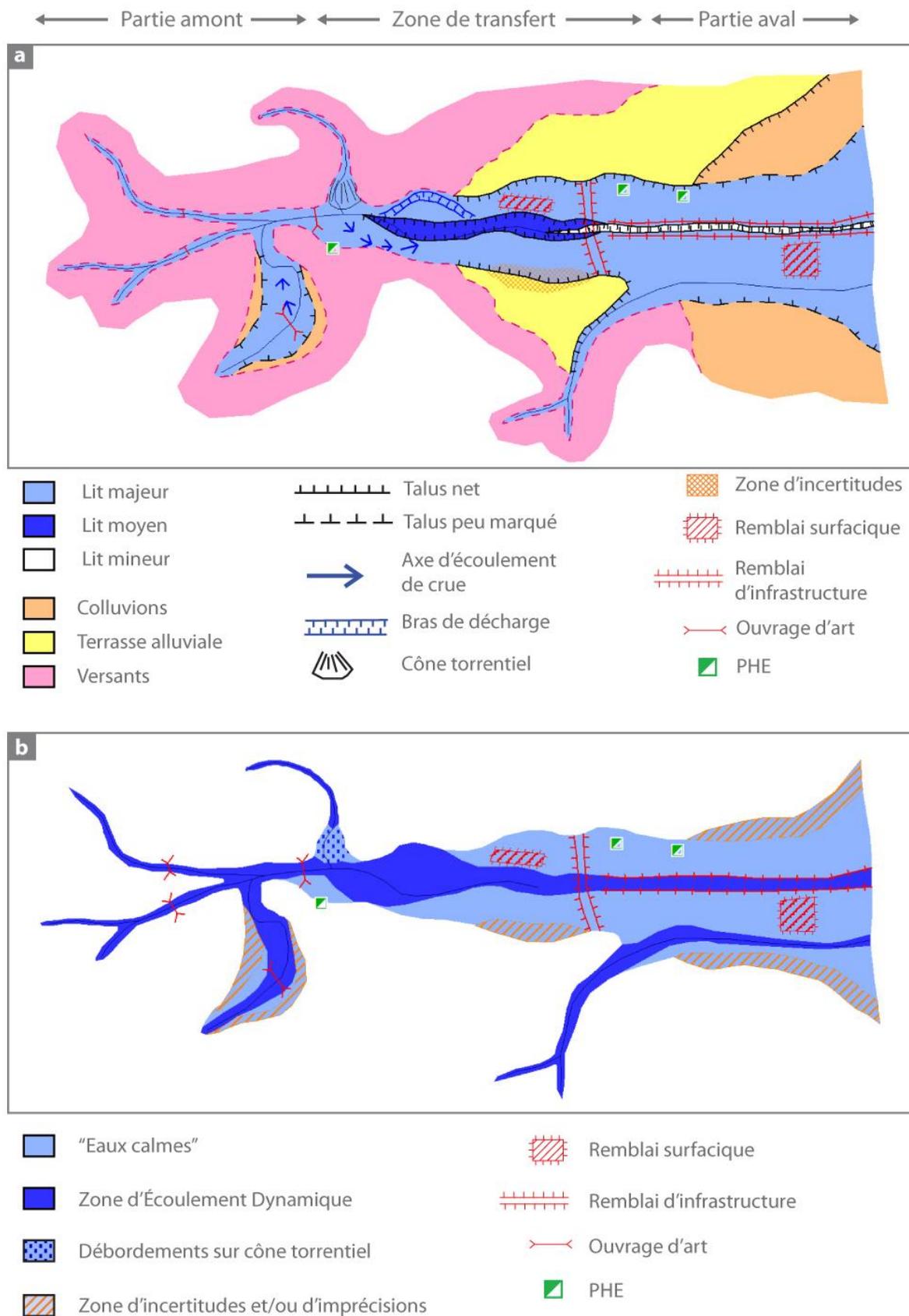


Figure 114 : Cartographies schématiques de l'actuelle légende des AZI hydrogéomorphologiques (a) et de proposition de simplification de la légende (b)

5.1.5 La simplification des AZI : éléments de conclusion

La simplification des AZI comprenait trois objectifs. En premier lieu, conserver l'interprétation naturaliste de la plaine alluviale comme fondement de la cartographie. Puis, permettre de communiquer plus facilement autour de l'aléa inondation. Enfin, optimiser la cartographie comme une donnée utilisée par la suite par des documents d'urbanisme tels que les PPRI.

Si les types de formes ont disparu de la carte, leur interprétation constitue toujours une étape indispensable pour l'AZI. Toute l'interprétation repose sur une combinaison de l'analyse de la topographie, associée à des expertises de terrain. La diminution du nombre d'informations géographiques, le recentrage sur la zone inondable et la focalisation sur les processus et non sur les formes constitue un atout pour une communication plus efficace autour de l'aléa inondation. Seule la table « S_INON » est employée dans les PPRI. En diminuant le nombre de tables, la production de l'AZI devient plus pertinente. Il subsiste cependant des doutes sur la compatibilité entre la cartographie de zones d'incertitudes et d'imprécision et l'instruction de PPRI.

Ce type d'AZI est plus rapide à réaliser car il ne comporte plus les tables telles que les talus qui parasitent le temps de travail. Le recentrage sur les processus et notamment la définition de la ZED permet de mieux représenter l'hydrodynamisme d'une inondation. Le bleu foncé, habituellement réservé au lit moyen permet de mettre visuellement l'accent sur des lits majeurs qui peuvent comporter des écoulements rapides. L'intégration des incertitudes et imprécisions dans la table des zones inondables constitue une forme de transparence de la part du géomorphologue.

Afin d'obtenir la cartographie finale de l'AZI, la cartographie hydrogéomorphologique classique est toujours nécessaire. Les géomorphologues doivent observer et analyser la morphologie de la plaine. Mais la cartographie hydrogéomorphologique n'est plus le résultat final. C'est une étape du processus de réflexion qui mène à la communication, dont l'AZI simplifié est l'objet central (Figure 115). La qualification des unités hydrogéomorphologiques (encaissant, lits fluviaux, traces d'hydrodynamisme) constituent autant d'indices pour représenter le plus fidèlement possible les zones inondables. Il doit subsister une différence entre les formes que l'on observe sur le terrain et la manière dont on communique autour d'elles. Cette distinction entre une sphère de réflexion et une sphère de communication est abordée par Di Biase (1990) pour définir le type d'information visuelle adaptée.

La simplification de l'AZI nous amène à produire une cartographie dont la légende s'approche des CIZI développés en région Midi-Pyrénées (Lambert *et al.*, 2000). Mais la cartographie proposée envisage la distinction de différentes classes à l'intérieur des zones inondable en fonction de l'intensité de l'aléa. Alors que pour les CIZI, la distinction se réalise en fonction de la fréquence d'aléa.

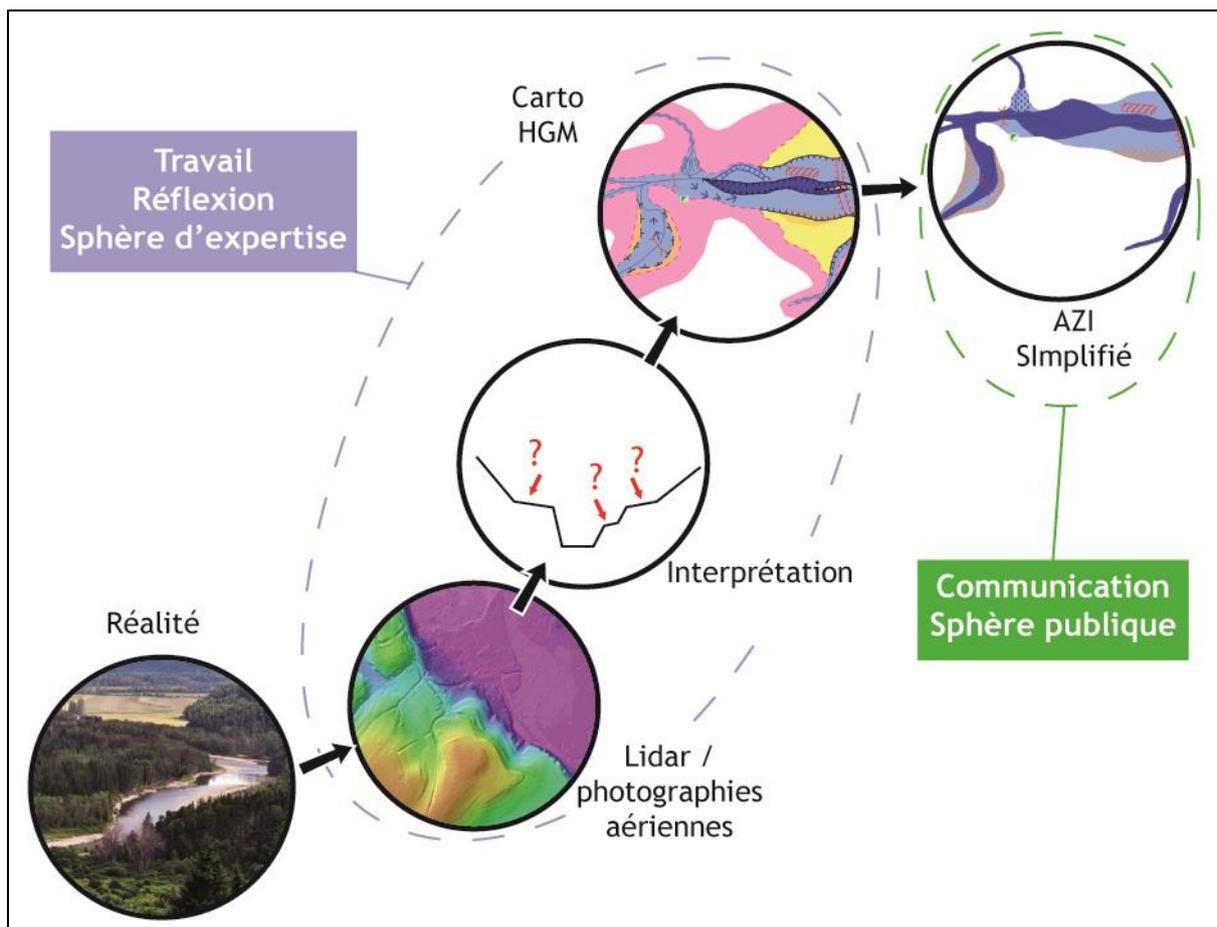


Figure 115 : La cartographie hydrogéomorphologique, une étape entre la réalité et l'AZI

5.2 La « cartographie positive » : une mise en valeur de l'interprétation hydrogéomorphologique

Les inondations possèdent une connotation négative. Elles causent des perturbations, des pertes financières, voire humaines. Lorsque l'on souhaite gérer l'urbanisation dans les zones inondables, l'accent est mis sur des interdictions, vécues comme un frein au développement des territoires, notamment pour les sociétés occidentales où « (...) l'immobilier est l'un des moteurs essentiels de l'économie » (Collombat, 2012).

Avec le concept de « cartographie positive », nous cherchons à identifier de quelle manière la cartographie hydrogéomorphologique peut être mise en valeur dans une perspective d'aménagement de territoires.

5.2.1 Inondations : du négatif au positif

La prise en compte du risque d'inondations dans le cadre d'une planification urbaine est source de conflits entre d'une part l'Etat qui « dit le risque » et les collectivités locales qui voient leurs stratégies de développement local remises en cause (Beucher et Rode, 2009).

Une solution pour sortir de cette spirale conflictuelle est d'envisager les zones inondables non pas uniquement en termes de contraintes, mais aussi en termes de potentialités. Cette idée est reprise par Vinet (2010) avec le principe de la « carte-solution ». En guise de conclusion au retour d'expérience des inondations du Var en 2010, Collombat (2012) estime que l'intégration du risque d'inondation dans le développement territorial ne peut se réaliser qu'à condition que ce projet « fasse d'un handicap un atout ».

S'appuyer sur les fonctions des cours d'eau et des zones inondables pour les valoriser, c'est ce que propose Degardin (2002). En détaillant des types fonctions attribués aux zones inondables, telles que la mise en valeur écologique ou l'expansion des crues, l'auteur propose des solutions concrètes pour mettre en valeur durablement les zones inondables. Dans la pratique certains exemples montrent que cette logique peut être adoptée. Le SCOTERS (Schéma de Cohérence Territoriale de la Région de Strasbourg) emprunte cette voie en proposant des potentiels de mise en valeur des zones inondables. (Blanc *et al.*, 2002). Le SCOT identifie quatre possibilités de mise en valeur : le potentiel paysager, le potentiel de loisirs (promenades, loisirs liés à l'eau, pêche...), le potentiel économique (agriculture...) et le potentiel écologique (forêts alluviales, faune spécifique...). Ces potentiels, sont dans les faits, interdépendants. La troisième correction du Rhône Suisse fut entreprise suite aux inondations qui touchèrent sa portion valaisanne en 2005 (Canton du Valais, 2008). Les travaux visent en priorité à élargir le lit mineur du Rhône. Mais il est également question de repenser les usages des portions riveraines en proposant comme pour le SCOTERS d'axer l'aménagement des zones inondables en fonction des aspects paysagers, écologiques ou touristiques.

Les inondations de 1999 dans le Sud de la France, la Berre causa de nombreux dégâts, notamment dans la commune de Durban-Corbières. Suite à cette catastrophe, il fut réalisée une réflexion sur

l'occupation du sol de la commune (CETE Méditerranée, 2012). Ce travail permet un rééquilibrage de l'étalement urbain hors des zones inondables, ainsi que la relocalisation de bâtiments stratégiques tels que la station d'épuration, la gendarmerie ou l'école primaire.

La cartographie hydrogéomorphologique, en plus de délimiter les zones inondables, permet une description des unités géomorphologiques de la plaine alluviale (Ballais *et al.*, 2005; Masson *et al.*, 1996). Chacune de ces unités possède des caractéristiques qui permettent de définir des contraintes et des potentialités en termes d'aménagement du territoire (Masson *et al.*, 2003). Ce travail met en avant les avantages et les inconvénients de chacune des unités géomorphologiques vis-à-vis d'un type de mise en valeur territoriale.

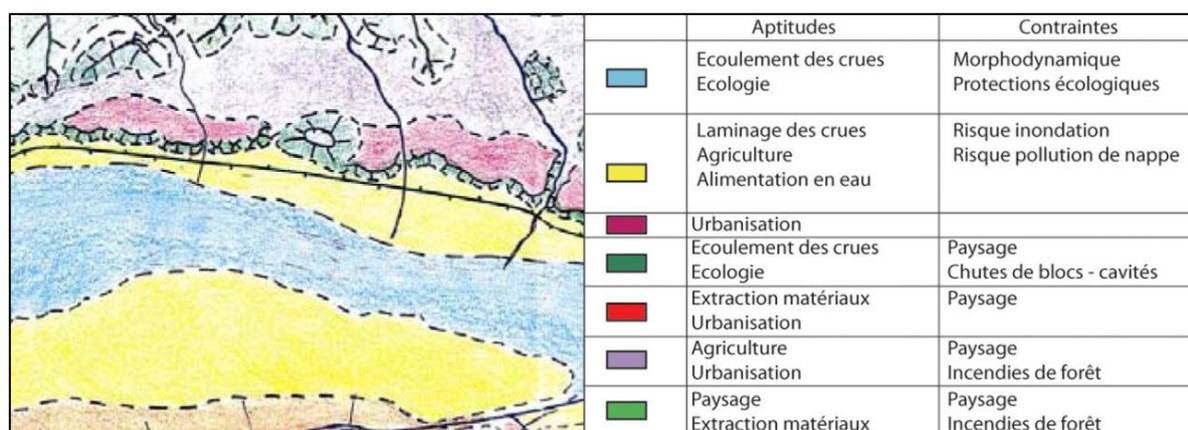


Figure 116 : Carte d'aptitudes et de contraintes (Source : Masson *et al.*, 2003)

Au lieu de disposer d'un zonage réglementaire où chaque zone est associée à différentes règles et recommandations, la cartographie positive propose une entrée par les types de mise en valeur possibles du territoire. Cette vision peut se révéler intéressante pour les territoires à forte pression urbaine réalisant une réflexion sur leur schéma d'aménagement.

La réflexion menée autour de la « cartographie positive » vise à identifier comment la cartographie hydrogéomorphologique peut participer à la mise en valeur des territoires concernés par l'aléa inondation. Il s'agit ici de présenter quelles informations utiles à l'aménagement du territoire, en plus de la spatialisation des zones inondables, peuvent émerger d'une cartographie hydrogéomorphologique.

Nous ne prétendons pas à ce stade de la réflexion d'élaborer une méthodologie universelle. Il s'agit plutôt de proposer des pistes de réflexion qui peuvent être déclinées au gré des caractéristiques de chaque territoire.

5.2.2 Méthodologie

Afin d'identifier comment la cartographie hydrogéomorphologique peut participer à l'aménagement du territoire, nous proposons une méthodologie composée de cinq phases (Figure 117). Dans un premier temps il est nécessaire de définir les unités hydrogéomorphologiques employées dans l'étude. Cette étape est constituée d'une description des principaux types d'unités. Puis, dans un second temps, intervient le choix des mises en valeur territoriales, correspondant aux différentes possibilités d'aménagement du territoire. La troisième étape consiste à croiser les formes de mise en valeur et les types d'unités hydrogéomorphologiques afin d'obtenir des indices de contrainte ou de potentialité par unité. Ensuite, se situe la phase de visualisation des valeurs de contraintes et potentialités dans un logiciel de SIG, après avoir mis à jour chacune des entités. Enfin, la carte de synthèse des potentialités permet de repérer l'atout majeur de chacune des unités.

Le secteur d'étude correspond aux 30 km les plus en aval de la rivière Matane. C'est le même secteur que celui étudié dans le cadre de la réalisation du MNZI de la rivière Matane.

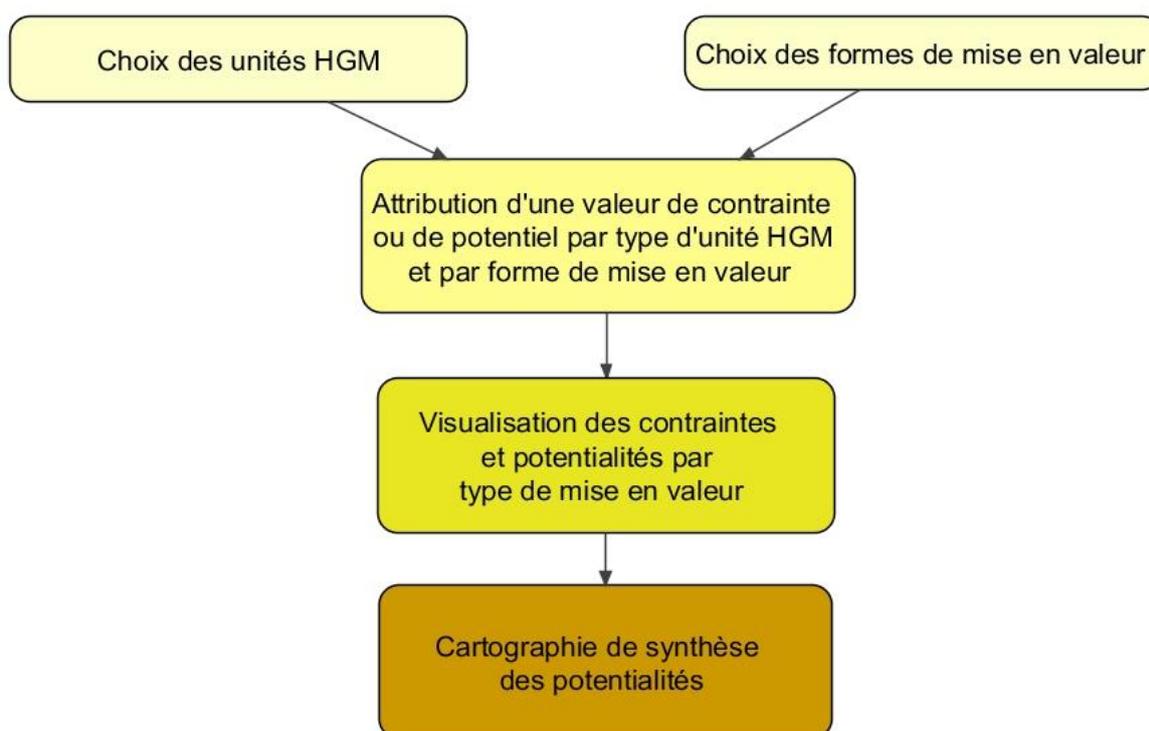


Figure 117 : Méthodologie employée pour la réalisation de la cartographie positive

5.2.2.1 Choix des unités hydrogéomorphologiques

La première étape consiste à définir les unités hydrogéomorphologiques (Figure 118) qui serviront de canevas à la cartographie finale. C'est la cartographie réalisée par l'UQAR (Demers *et al.*, 2012; Olsen *et al.*, 2011) pour le compte du Ministère de la Sécurité Publique du Québec qui est utilisée.

Cette cartographie comporte trois niveaux. Le niveau 1 correspond au lit moyen, les niveaux 2 et 3 correspondent au lit majeur. A cela s'ajoute la zone inondable des affluents (aléa indifférencié), les cônes torrentiels actifs, les terrasses alluviales anciennes, et les versants. La particularité de la cartographie hydrogéomorphologique est de s'intéresser aux zones non inondables. C'est bien cette opposition entre inondable et non inondable qui est mise en valeur par la cartographie positive.

Notons que l'exemple de la Matane présente un atout majeur : la distinction de plusieurs niveaux alluviaux au sein de la zone inondable.

Les terrasses alluviales et les versants ne font pas partie de la cartographie développée par l'UQAR qui se focalise sur les unités de la zone inondable. La limite de la zone d'étude qui figure en pointillés noirs sur la carte (Figure 118) correspond à un bande de près de 500 m autour de la zone inondable.

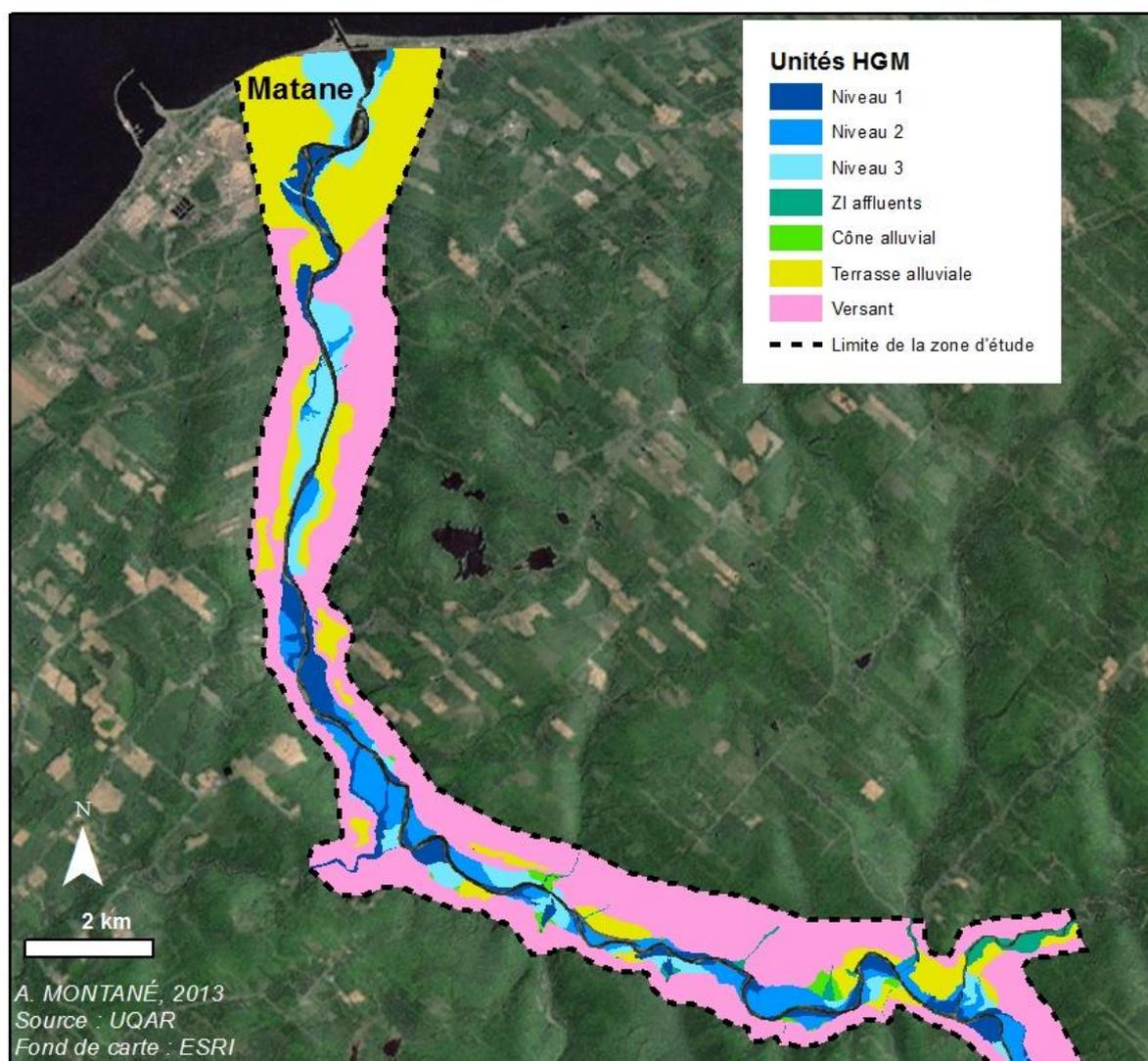


Figure 118 : Les unités hydrogéomorphologiques utilisées

5.2.2.2 Choix des formes de mise en valeur

Cet exemple ne vise pas à présenter une liste exhaustive de toutes les formes de mise en valeur possible. Nous proposons de nous concentrer sur des types d'occupation du sol fréquemment cités dans des PPRI ou encore des SCOT. Nous choisissons quatre types de mise en valeur :

- les nouvelles habitations et activités économiques ;
- les enjeux sensibles aux inondations et/ou utiles à la gestion de crise ;
- mise en valeur écologique ;
- agriculture.

5.2.2.2.1 *Nouvelles habitations et activités économiques*

Ils constituent la majorité des constructions et concernent la majeure partie des réglementations dans les PPRI et dans la PPRLPI (Garry et Graszka, 1999; Gouvernement du Québec, 2005). L'intensité de l'aléa inondation déterminée par l'interprétation hydrogéomorphologique reste le paramètre majeur de différenciation de constructibilité. Les niveaux 1 et 2 peuvent comporter des écoulements rapides et des hauteurs d'eau supérieures à 2 m. Cela constitue une contrainte à l'implantation de bâtiments. En plus de l'aléa inondation, l'aléa érosion, très présent en lit moyen, devient une contrainte supplémentaire. Le niveau 3 caractérisé par des hauteurs d'eau inférieures à 1 m est défini par une moindre pression de l'aléa inondation. Les cônes alluviaux actifs présentent une exposition à l'aléa inondation réduite et surtout une intensité inférieure à celle du cours d'eau principal. Les versants et les terrasses alluviales sont eux exemptés de toute contrainte relative à l'aléa inondation.

5.2.2.2.2 *Enjeux sensibles aux inondations et/ou utiles à la gestion de crise*

Cette catégorie regroupe plusieurs types de bâtiments. Elle concerne les établissements sensibles aux inondations (école, maison de retraite, hôpital...), ainsi que les bâtiments utiles à la gestion de crise (casernes de pompiers, police, mairie...). A cela nous pouvons ajouter les axes de transport stratégiques, les terminaux de transport (station de bus, gare...), les stations d'épuration ou les transformateurs électriques (Photographie 18). L'inondation de ces bâtiments et enjeux sont autant de paramètres qui compliquent la gestion de crise (Vinet, 2010).



Photographie 18 : Transformateur électrique surélevé dans le lit majeur de la Matane

Comme pour les habitations et les activités économiques, les informations relatives à l'aléa inondation restent prises en compte. Nous appliquons pour ces enjeux la logique mise en avant par l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI du Midi méditerranéen (Cf. Chapitre 2). Pour rappel, certains PPRI prennent en considération dans le zonage réglementaire, l'enveloppe hydrogéomorphologique, en plus de la crue de référence. La cartographie hydrogéomorphologique, nommée aléa résiduel dans le département du Gard, prévoit l'interdiction des bâtiments utiles à la gestion de crise et des établissements sensibles⁸⁶. La construction d'autres habitations ou d'activités économiques reste possible sous réserve d'application de prescriptions relatives au rehaussement du premier plancher.

C'est pour ce type d'occupation du sol que la cartographie hydrogéomorphologique se montre particulièrement avantageuse. Elle permet, en plus d'analyser les zones inondables de mettre l'accent sur les zones non inondables. L'amplitude de la cartographie d'une crue centennale pourrait être dépassée par un événement futur. En revanche, les zones non inondables de la cartographie hydrogéomorphologique garantissent d'être hors d'atteinte de toute inondation par débordement fluvial.

La prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique pour l'implantation de ces enjeux sensibles aux inondations ou utiles à la gestion de crise est un atout pour réduire la vulnérabilité des territoires concernés.

La construction en zone inondable d'un bâtiment occupé par des personnes vulnérables, tel un hôpital, est un problème, comme le mettent en avant les cartes de risque de la « Directive Inondation ». Les Pays-Bas proposent une vision à contre-courant pour cette problématique. Il existe en effet un projet de construction du futur hôpital de Rotterdam en zone inondable, mais conçu pour fonctionner en cas de submersion. Le bâtiment constituerait une zone de replis en cas d'inondation (Collombat, 2012).

⁸⁶ [DDE du Gard, 2008a. Plan de Prévention des Risques d'Inondation du Gardon Amont. Rapport de présentation.](#)

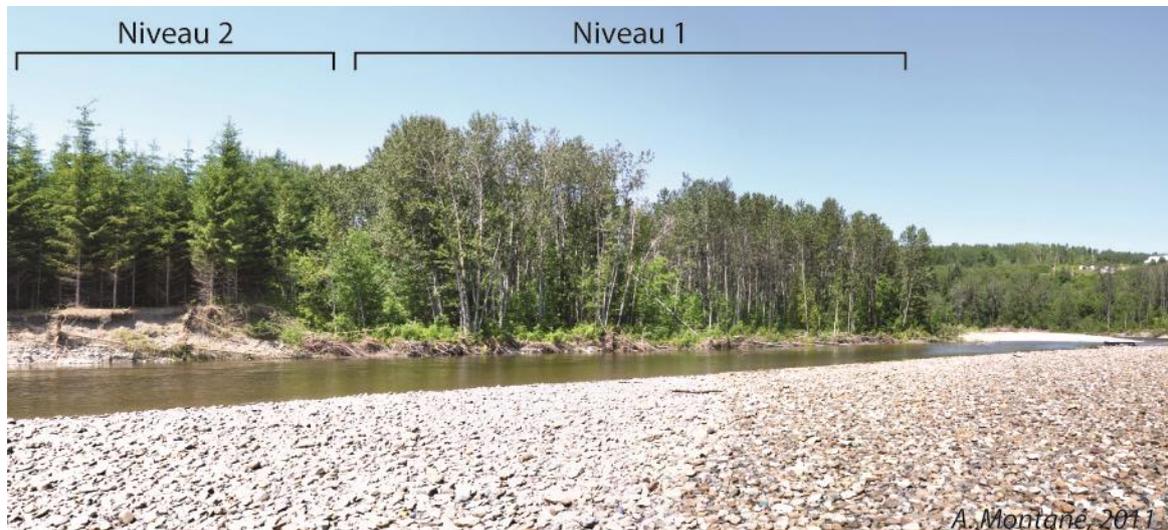
Voilà comment transformer un facteur d'aggravation de la vulnérabilité des territoires en une source de réduction de vulnérabilité. Ce contre-exemple reste cependant le reflet d'une culture de la construction en zone inondable propre aux Pays-Bas (Baan et Klijn, 2004; Messner et Meyer, 2006).

5.2.2.2.3 *Mise en valeur écologique*

Du point de vue écologique, c'est la préservation du lit moyen (zone 1) qui reste le point le plus important (Photographie 19). Comme mentionné par (Piégay *et al.*, 2003), la ripisylve constitue la formation végétale naturelle du lit moyen. C'est un environnement à la biodiversité exceptionnelle qui présente des utilités diverses. Le lit moyen joue par exemple le rôle d'écrêteur de crue et peut également retenir les sédiments et les débris ligneux facteur potentiel d'embâcle plus en aval.

La conservation de la ripisylve contribue à la bonne qualité de l'eau en agissant comme une zone tampon entre la plaine alluviale et le cours d'eau en favorisant l'épuration des eaux et notamment la régulation des flux de nitrates (Ruffinoni, 1996). La qualité de cet environnement influence directement la présence d'espèces aquatiques et terrestres (Howson *et al.*, 2012; Piégay *et al.*, 2003).

Selon l'OMT (Organisation Mondiale du Tourisme), les recettes liées au tourisme ont augmenté de 6,4 % par an dans le monde entre 1990 et 2012⁸⁷. En parallèle, on note une plus grande sensibilité de la population aux problèmes environnementaux (Lequin, 2001). Ces deux tendances se matérialisent au travers du concept d'écotourisme (Blamey, 2001; Tardif, 2003).



Photographie 19 : distinction entre le niveau 1 (lit moyen) et le niveau 2 (lit majeur), sur la rivière Matane

5.2.2.2.4 *Agriculture*

Plusieurs paramètres influencent la pertinence du développement de l'agriculture. L'aléa inondation constitue le premier d'entre eux. Le lit mineur demeure l'espace le moins propice à l'agriculture, en

⁸⁷ [INSEE. Recettes du tourisme international en 2012](#)

raison de l'intensité potentielle des crues, mais aussi de l'érosion des berges. Le niveau 3 du lit majeur est concerné de manière résiduelle par l'aléa inondation et présente l'avantage d'être très stable dans le temps (Olsen *et al.*, 2011).

Cette vision reste très simpliste. En effet, en fonction du type d'agriculture la vulnérabilité des installations diffère (Brémond, 2011). La méthode inondabilité développée par le CEMAGREF propose de croiser des paramètres d'aléa et de vulnérabilité afin d'obtenir des situations « acceptables » ou « inacceptables » (Gilard, 1998).

5.2.2.3 Attribution des valeurs de contrainte et de potentialité

Une fois l'analyse des différentes contraintes et potentialités effectuées, il convient dès lors d'attribuer un indice à chacune des mises en valeur. L'indice de contrainte ou de potentialité correspond à une échelle de -2 à 2. Une valeur de -2 signifie que la zone concernée n'est pas adaptée au type de mise en valeur. Au contraire, une valeur de 2 exprime une compatibilité entre le type de mise en valeur et l'espace concerné. A mi-chemin, la valeur de 0 signifie que la zone en question n'est pas propice à la mise en valeur concernée, mais que les contraintes sont également faibles.

Pour notre exemple, les valeurs de contrainte et de potentialité sont indiquées pour trois types de mise en valeur (Tableau 14). Les habitations et activités économiques sont très contraintes par l'aléa inondation pour les niveaux 1 et 2, ainsi que pour la zone inondable des affluents. En revanche le niveau 3, ainsi que les cônes alluviaux acquièrent respectivement des valeurs de 0 et -1. L'interprétation hydrogéomorphologique ne montre à l'inverse aucune contrainte pour leur développement sur les terrasses alluviales et les versants (Photographie 20). La potentialité de construction sur les terrasses demeure plus faible pour les versants (1) que pour les terrasses (2) en raison du caractère inondable plus prononcé de ces dernières.



Photographie 20 : Lit majeur, terrasse alluviale et versant autour de la rivière Matane

Les bâtiments qui participent à la gestion de crise et les établissements vulnérables comportent des indices de contrainte et de potentialité proches de ceux des habitations et des activités économiques. La seule différence réside dans le niveau 3, où l'indice passe en négatif (-1). Cette distinction permet de mettre en valeur les zones non inondables comme secteur privilégié pour les bâtiments sensibles à la gestion de crise.

Tel que mentionné précédemment, la mise en valeur écologique présente un intérêt essentiellement pour le lit moyen. En conséquence, celui-ci se voit attribué un indice de 2. Le restant des unités acquiert un indice de 1, mise à part le niveau 3 du lit majeur qui compte-tenu de la présence massive d'agriculture et de bâtiments reste peu intéressant pour une mise en valeur écologique.

Enfin, l'agriculture comporte une potentialité maximale pour le niveau 3 (lit majeur, les cônes alluviaux et les terrasses alluviales).

Type d'unité	Habitation et activité économique	Établissement sensible aux inondations et/ou utile à la gestion de crise	Mise en valeur écologique	Agriculture
Lit moyen (niveau 1)	-2	-2	2	-2
Lit majeur (Niveau 2)	-2	-2	1	1
Zone inondable affluents	-2	-2	1	1
Lit majeur (Niveau 3)	0	-1	0	2
Cône alluvial	-1	-1	1	2
Terrasses alluviales et cône inactif	2	2	1	2
Versant	1	1	1	0

Tableau 14 : Valeurs de contrainte et de potentialité retenues

5.2.2.4 Visualisation des contraintes et potentialités par type de mise en valeur

La représentation cartographique des quatre types de mise en valeur (Figure 119 et Figure 120) permet de délimiter spatialement les contraintes et potentialités associées à chacune des mises en valeur.

Les habitations et les activités économiques conservent une valeur de potentiel positive sur la majorité de la zone d'étude (Figure 119). La répartition spatiale des bâtiments utiles à la gestion de crise et les établissements sensibles aux inondations demeure très proche de la précédente. Le potentiel de mise en valeur écologique est réparti de manière homogène le long du cours d'eau avec toutefois une concentration plus élevée directement en amont de la ville de Matane (Figure 120).

Une majorité de la zone d'étude garde une valeur positive et reste donc favorable à l'implantation d'habitations ou d'activités économiques.

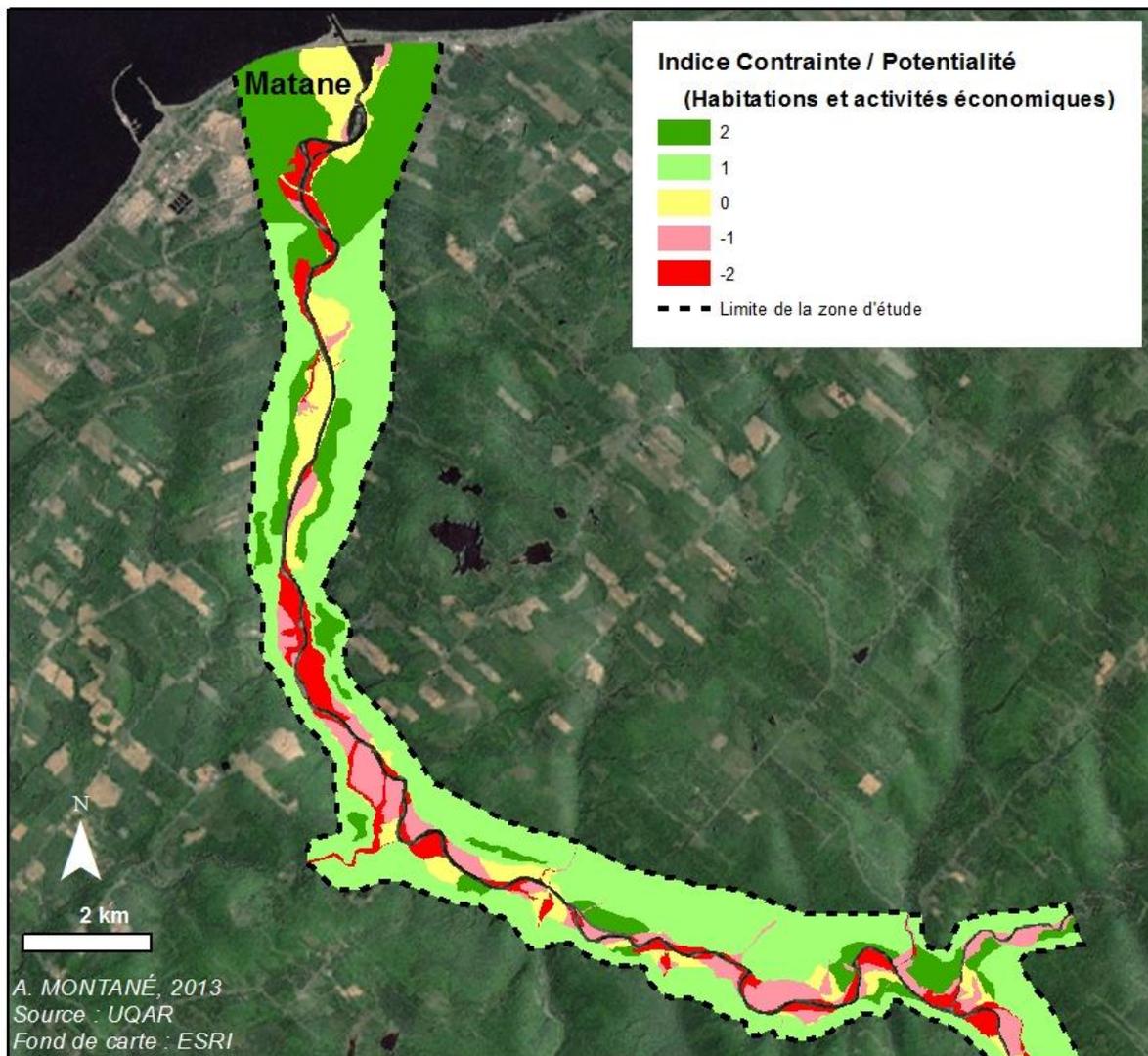


Figure 119 : Contraintes et potentialités pour les habitations et les activités économiques

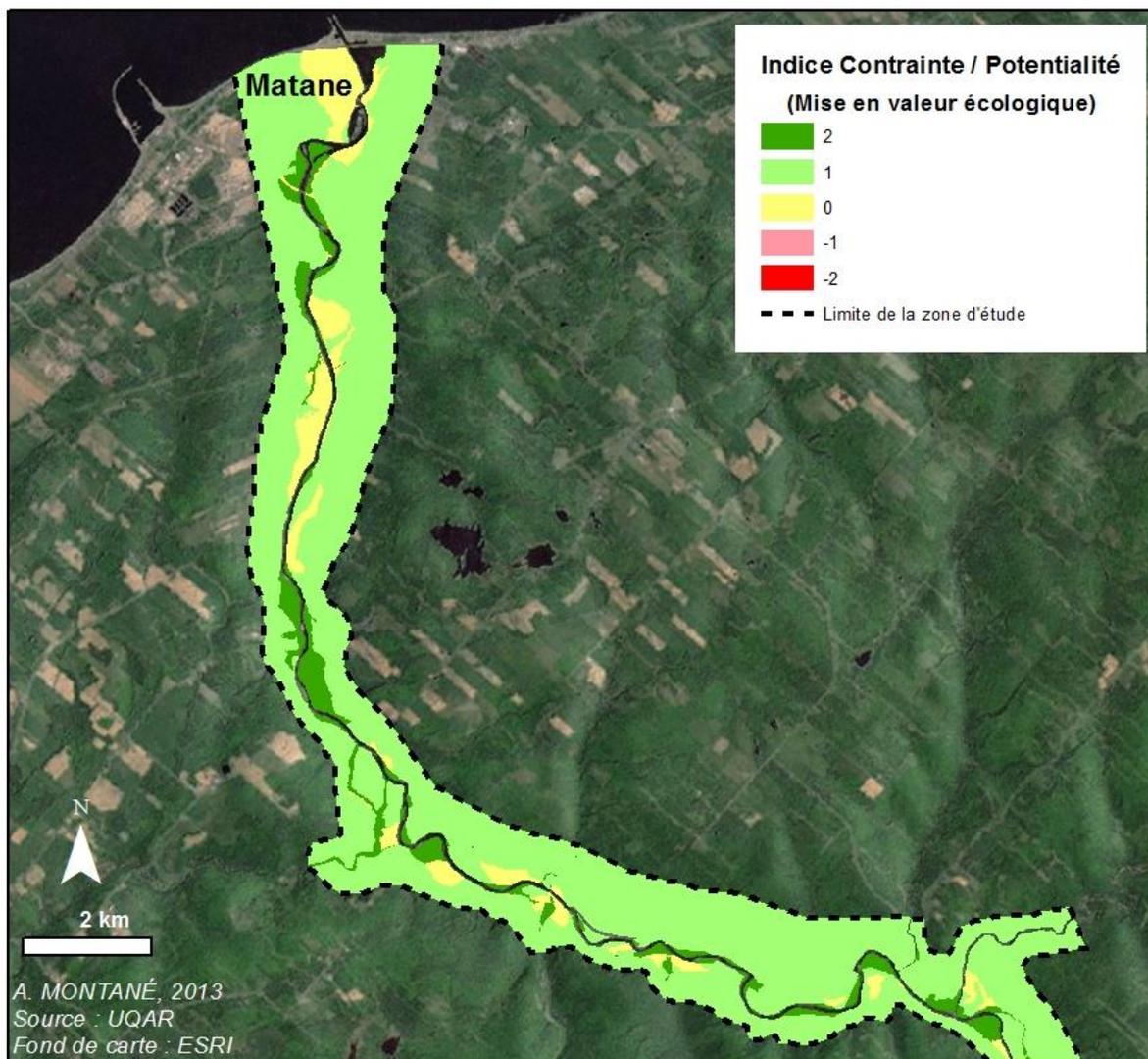


Figure 120 : Potentialités de mise en valeur écologique

5.2.2.5 Synthèse des potentiels

L'étape précédente a permis d'illustrer les contraintes et les potentialités pour quatre types de mise en valeur territoriale. Dans la perspective de présenter uniquement les potentialités de la zone d'étude, nous identifions pour chacune des unités le type de mise en valeur le plus approprié (Figure 121).

La mise en valeur écologique concerne uniquement le lit moyen (niveau 1). Le niveau 2 du lit majeur possède surtout un intérêt pour l'agriculture. Le niveau 3 du lit majeur correspond à une mise en valeur mixte, entre l'agriculture et le développement d'habitations et d'activités économiques. En revanche, l'extérieur de la zone inondable reste propice à l'implantation de toute sorte de bâtiments, y compris ceux utiles à la gestion de crise.

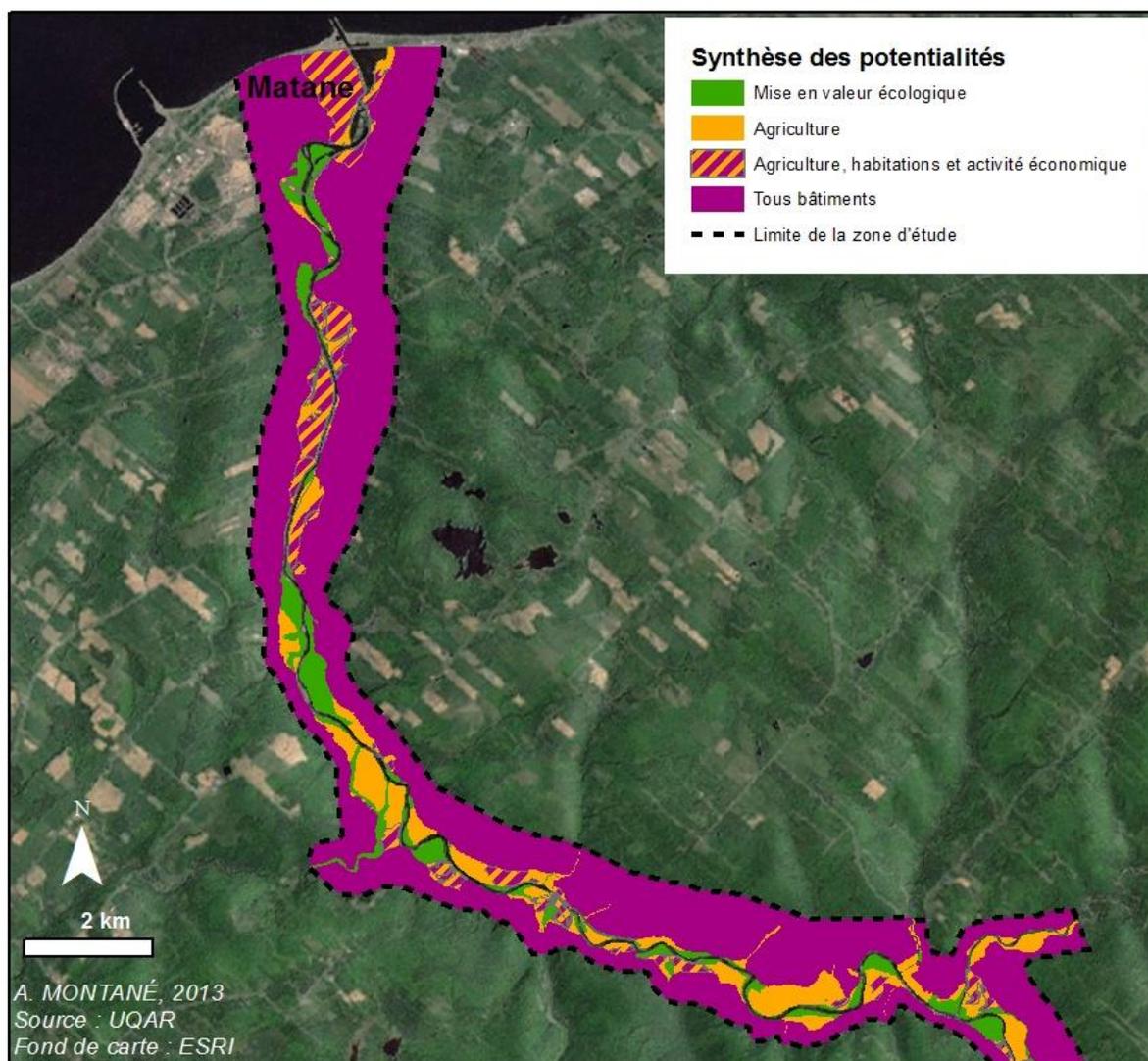


Figure 121 : Cartographie de la synthèse des potentialités sur la rivière Matane

5.3 Conclusions

Ce chapitre souligne et illustre les raisons qui poussent la cartographie à évoluer, ainsi que les formes que peuvent prendre ces évolutions.

L'analyse de la compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique fournit des réponses sur la compréhension de la carte par un public en partie non expert. La majorité des personnes interrogées comprend le code couleur des zones inondables. Toutefois les unités de l'encaissant et en particulier les terrasses alluviales apportent de la confusion quant à la localisation des zones inondables. De plus, le figuré du lit majeur ne permet pas de prendre la mesure de l'aléa inondation.

Après avoir analysé les limites d'un AZI hydrogéomorphologique, nous avons proposé une simplification de ceux-ci. La représentation cartographique se recentrerait désormais sur la zone inondable. Les formes (lits mineur, moyens...) disparaissent au profit d'une interprétation des

processus. Le nombre de tables SIG diminue. Dans une optique de réutilisation dans des PPRI, la cartographie des zones inondables devient plus efficiente.

Cette simplification de l'AZI met en avant un point primordial. La cartographie hydrogéomorphologique ne constitue pas un résultat final. Elle doit demeurer une étape de travail pour le géomorphologue. L'aspect et le contenu du résultat final dépendent de l'objectif de l'étude menée.

Nous évoquons dans le chapitre 1 les quiproquos que peut entraîner le terme d'hydrogéomorphologie, qui peut endosser différentes significations selon les auteurs. Afin de donner à ce terme le sens de « l'étude des formes terrestres engendrées par l'action de l'eau » (Scheidegger, 1973) il serait pertinent d'employer une terminologie plus spécifique pour toute étude qui se rapporte à la cartographie des zones inondables. Nous pourrions par exemple parler de CHZI (Cartographie Hydrogéomorphologique des Zones Inondables) dès lors que celle-ci possède pour objectif d'être intégrée dans une politique de gestion du risque d'inondation.

En revanche, dans le cas d'une problématique d'aménagement des territoires, la vision « classique » de la cartographie hydrogéomorphologique conserve son intérêt. La cartographie positive apporte quelques réponses pour faire le lien entre l'interprétation du géomorphologue et l'aménagement du territoire. Les caractéristiques de chacune des unités hydrogéomorphologiques permettent de mettre en avant des contraintes et des potentialités. Ce type d'analyse peut être appliqué ponctuellement. La cartographie positive peut constituer un outil d'aide à la décision pour des territoires qui cherchent à réfléchir sur leurs dynamiques territoriales. Notons certaines limites à cette approche. Des unités comme le lit moyen ne sont pas présents sur tous les cours d'eau. De plus, il reste primordial de se détacher de la vision très déterministe que ce type d'analyse procure.



Chapitre 6

Conditions et modalités du développement de la cartographie hydrogéomorphologique

Comprendre et favoriser le développement de l'approche hydrogéomorphologique font partie des motivations premières de ce travail de thèse. La compréhension de ce que représente la cartographie hydrogéomorphologique comprend plusieurs aspects. L'aspect réglementaire est abordé à travers l'utilisation de l'hydrogéomorphologie dans les PPRI. L'évolution de la cartographie est prise en compte dans l'élaboration de MNZI et dans la simplification des AZI. Des problématiques plus géomorphologiques sont davantage mises en avant à travers l'analyse du niveau de confiance.

La compréhension et la recherche de solutions pour améliorer chacun des aspects de la cartographie hydrogéomorphologique possèdent un objectif commun. Il s'agit de participer au développement des pratiques visant une meilleure gestion du risque d'inondation sur des territoires exposés. Afin d'aboutir à cette situation, nous devons établir une vision systémique et élargie de l'utilisation de l'hydrogéomorphologie. Cette vision systémique reprend les différents résultats obtenus précédemment. Il les assemble afin d'établir des étapes indispensables à la pérennisation de l'approche hydrogéomorphologique dans un territoire.

Dans ce chapitre d'ouverture, nous souhaitons identifier les étapes indispensables au développement de la cartographie hydrogéomorphologique. Puis nous appliquons ce système dans la perspective d'un renouvellement de l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique en France. Nous envisageons également de quelle manière la cartographie hydrogéomorphologique peut être adaptée au contexte québécois et en particulier à la réglementation en vigueur.

6.1 Les conditions du développement de la cartographie hydrogéomorphologique

La place qu'occupe la cartographie hydrogéomorphologique dans la gestion du risque inondation en France est le fruit d'un processus qui s'étale sur plus de 30 ans. En tentant de trouver une logique dans ce processus, nous cherchons en particulier à identifier à quel niveau se situe le travail de recherche entrepris.

Conduire le développement de l'hydrogéomorphologie implique de définir précisément plusieurs étapes. Cette succession d'étapes vise faire évoluer une situation dans laquelle la cartographie hydrogéomorphologique est absente des pratiques de gestion du risque inondation, à une situation où les acteurs majeurs adhèrent à la méthode.

Guy Rocher (1970) définit le changement comme « toute transformation observable et vérifiable dans le temps qui affecte d'une manière qui n'est pas provisoire la structure ou le fonctionnement d'une collectivité et qui en modifie le cours de son histoire ». Kuhn (1996) considère la science et particulièrement de changement de paradigme comme un phénomène social. Pour l'auteur, l'émergence d'un nouveau paradigme scientifique provient avant tout de l'échec du paradigme précédent. En faisant le parallèle avec la cartographie hydrogéomorphologique, nous pourrions expliquer l'émergence de la cartographie hydrogéomorphologique par le dépassement de crues centennales modélisées par un évènement historique.

Dans l'optique de favoriser ce changement, les sciences de gestion proposent des méthodologies pour décomposer les étapes indispensables à son apparition. La « Méthode de conduite du changement » (Autissier et Moutot, 2007) propose trois phases pour la réussite d'un changement institutionnel. Une phase de diagnostic, une phase de leviers et une phase de pilotage. Ces trois phases sont appliquées au développement de la cartographie hydrogéomorphologique (Figure 122).

En plus des trois phases, nous ajoutons les « éléments moteurs ». Ils constituent les faits favorables au développement de la cartographie hydrogéomorphologique. Si ces éléments moteurs sont présents, la phase de diagnostics permet ensuite de définir le périmètre des changements envisagés et d'anticiper les difficultés. L'actionnement des leviers du changement consiste à planifier et réaliser des actions de communication, de formation et de réaliser les premières études. En aval de ce processus se trouve la phase d'évaluation du changement (phase de pilotage). Cette dernière phase vise à évaluer les actions menées et le degré d'adhésion des acteurs du changement. Suite à cette évaluation, des modifications sont apportées au niveau de la phase de diagnostic ou des leviers du changement.

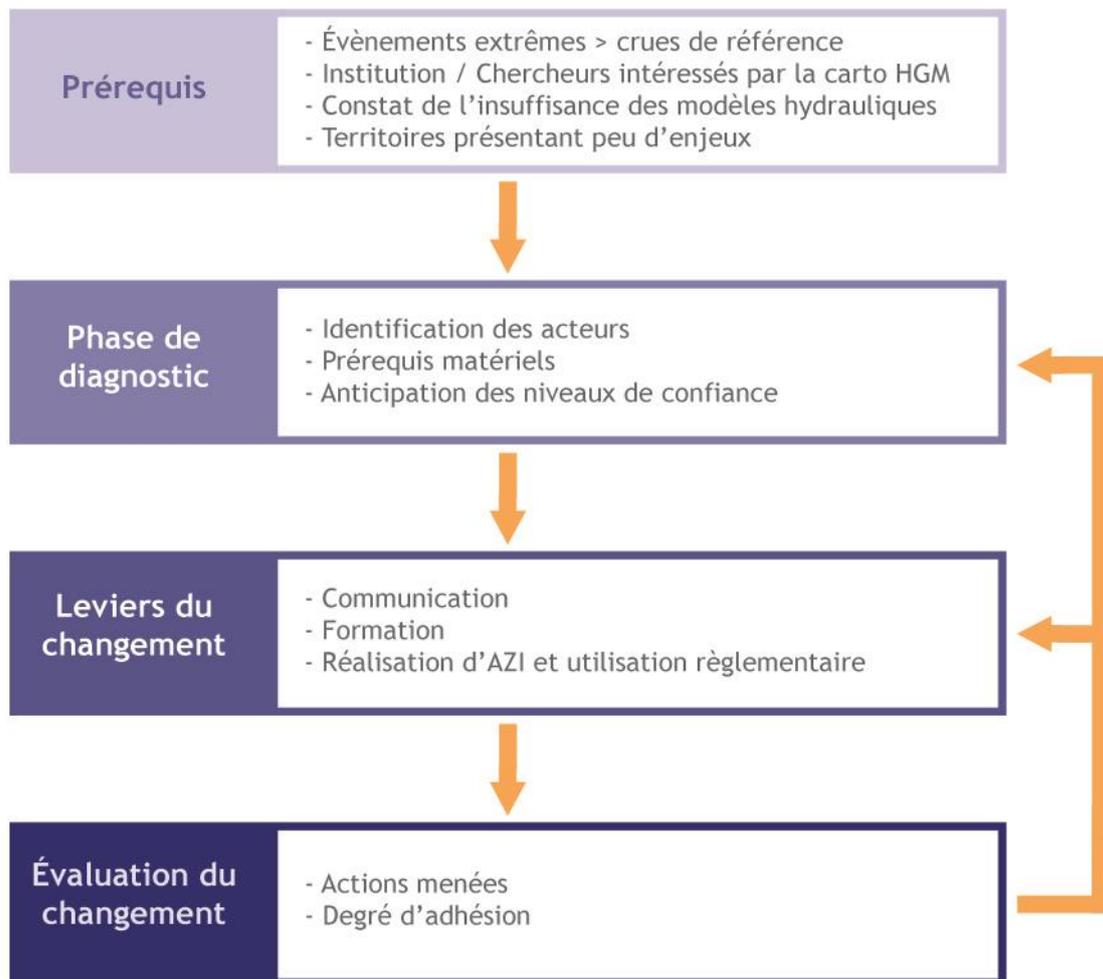


Figure 122 : Le développement institutionnel de la cartographie hydrogéomorphologique sur un territoire

La description des conditions de développement de la cartographie hydrogéomorphologique s'adresse en priorité aux gestionnaires du risque inondation sur leur territoire. Nous n'avons pas la prétention de fournir une méthodologie universelle, mais une approche simplifiée qui vise à valoriser durablement le rôle de l'hydrogéomorphologie dans la gestion du risque inondation.

6.1.1 Les prérequis du développement

La survenue de crues extrêmes apporte de la légitimité à la cartographie hydrogéomorphologique. Le fait qu'un événement dépasse une crue de référence historique ou centennale constitue un élément déclencheur. Dès lors, la recherche d'une méthode alternative qui permet de cartographier une enveloppe maximale des zones inondables devient incontournable. Ces événements constituent également l'occasion de constater que les modèles hydrauliques ne peuvent prendre en compte le fonctionnement géomorphologique des cours d'eau tels que l'érosion de berge ou encore les embâcles (Lelièvre *et al.*, 2008). La crise engendrée par une inondation majeure fait partie du développement de l'hydrogéomorphologie. Elle est révélatrice d'une lacune qu'il faut combler par une nouvelle approche.

Pour prendre son envol, la cartographie hydrogéomorphologique requiert une appropriation par les gestionnaires du risque. C'est le cas en France avec le ministère en charge de la gestion des risques ou au Québec avec le Ministère de la Sécurité publique. En plus des institutions, l'aspect scientifique repose sur des chercheurs (Ballais *et al.*, 2011; Demers *et al.*, 2014, 2012; Olsen *et al.*, 2011) ainsi que sur des organismes tels que le CÉTÉ (nouvellement CEREMA) en France.

Sur certains territoires qui présentent peu d'enjeux économiques et humains, la cartographie de l'aléa inondation par le biais d'une modélisation hydraulique peut sembler excessive. Afin de s'adapter à ce contexte, l'hydrogéomorphologie est une solution simple et peu chère. Elle est par exemple appliquée dans le cadre d'AZI ou de PPRI en Bourgogne (chapitre 2).

Notons que mis à part le rôle joué par une institution motrice, l'absence d'un des autres éléments n'est pas rédhibitoire pour le développement de la cartographie hydrogéomorphologique. La volonté affichée de développer la méthode reste le point central.

6.1.2 Phase de diagnostic

Les diagnostics permettent de préparer les changements à venir, pour que ceux-ci soient les plus efficaces possibles. Ils consistent notamment à identifier le cadre géographique du changement et par quels acteurs celui-ci pourra s'opérer. Identifier les acteurs qui participeront au développement de la cartographie hydrogéomorphologique est primordial. De manière générale ce processus permet de bien cibler les éventuelles résistances au changement et donc d'adapter la communication qui en découlera (Autissier et Moutot, 2007). Cette identification comporte plusieurs niveaux de détail. Un premier

niveau est relatif aux institutions et aux corps de métiers majeurs. Un deuxième niveau concerne les personnes ressource, susceptibles d'apporter une contribution précise au changement.

Le ministère en charge de la gestion du risque inondation est le premier acteur. Il possède le rôle majeur de financement des études. Le développement institutionnel de la méthode et la standardisation des cartographies demeure également un rôle primordial.

Les universitaires ont un rôle complémentaire. Ils s'occupent du développement scientifique de la méthode, mais aussi de la formation de personnes qualifiées pour la mise en œuvre de la méthode. Des expertises ponctuelles dans le cadre d'étude sont également envisageables. Cette expertise est empreinte d'une neutralité et d'un esprit critique à l'égard des actions entreprises.

Les bureaux d'étude ou sociétés d'ingénierie ont la charge de faire passer l'hydrogéomorphologie de la théorie à la pratique. Cette application demeure conditionnée par les méthodologies établies en amont de l'application de la méthode. L'identification des sociétés qui seront concernées par la cartographie hydrogéomorphologique constitue une étape indispensable pour préparer le besoin de formation et évaluer le degré de résistance à la méthode.

L'identification des personnes ressource vise à mettre en avant certaines expertises complémentaires. Par exemple, des expertises en géomorphologie, SIG, cartographie, gestion des risques ou en urbanisme permettent d'établir les priorités relatives au développement de la cartographie hydrogéomorphologique. Le principe est d'adopter une approche pluridisciplinaire afin d'éviter la focalisation sur un seul aspect de la problématique.

Dans l'optique de réaliser des cartographies hydrogéomorphologiques, certaines données doivent être répertoriées. C'est en particulier le cas de l'information géographique en rapport avec les inondations comme les repères de crue ou les cartographies d'aléa existantes. Ensuite la question des données topographiques doit être abordée, notamment les MNT LiDAR, dont l'utilisation croissante nécessite de définir la couverture disponible. La disponibilité des orthophotographies et des photographies aériennes utiles pour des éventuelles photo-interprétations doivent également faire l'objet d'un inventaire.

La disponibilité des données géographiques donne suite à la définition de besoins. La production de nouveaux MNT LiDAR représente certes un coût de départ non négligeable. Mais la possibilité de disposer de MNT de qualité homogène et utilisable pour des études très variées en font un investissement rentable à moyen terme.

Enfin, le diagnostic des niveaux de confiance à l'échelle de bassins versants peut constituer un atout pour le développement de la méthode (cf. Chapitre 4). Il peut permettre, notamment dans des contextes où les acteurs du risque inondation ne sont pas familiers avec l'approche, d'apporter des premiers éléments de réponse sur l'adaptation de celle-ci au contexte physique. Le fait de réaliser ce diagnostic sur de grands territoires permettrait d'évacuer le plus tôt possible les questionnements liés à sa validité scientifique et installerait un climat de confiance entre géomorphologues et gestionnaires du risque inondation.

A la fin de la phase de diagnostic, la connaissance des acteurs concernés par le changement, des données géographiques disponibles et les territoires propices à la cartographie hydrogéomorphologique doit permettre d'actionner plus aisément les leviers du changement.

6.1.3 Leviers du changement

Adopter une nouvelle méthodologie, même si celle-ci présente de nombreux avantages reste un processus très compliqué qui est source de nombreuses réserves de la part des acteurs concernés (Rogers, 2010). Pour diminuer la réticence au développement de la cartographie hydrogéomorphologique, des actions de communication et des premières applications de la méthode doivent être combinées.

6.1.3.1 Communication et formation

Pour être efficace, la communication et les formations doivent allier différents aspects. En premier lieu, des communications portant sur les fondements méthodologiques sont nécessaires (Demers *et al.*, 2014, 2012; Masson *et al.*, 1996; Olsen *et al.*, 2011). Ces communications permettent d'asseoir la visibilité de la méthode. Il reste important de diversifier les modes de communication. Les colloques et les articles permettent d'être en contact avec une sphère de chercheurs et de quelques gestionnaires. Mais pour communiquer auprès des sociétés d'ingénierie, les guides méthodologiques sont préférables (DIREN PACA, 2007). Les formations, ateliers et autres activités de transfert, de valorisation et de sensibilisation des travaux réalisés permettent aussi de créer un lien entre les gestionnaires, les analystes et les acteurs des milieux visés.

En plus de la méthodologie employée pour la réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques, d'autres thèmes participent à son essor. Des comparaisons entre des crues historiques et des cartographies hydrogéomorphologiques sont nécessaires. Elles permettent d'inscrire les zones inondables dans la réalité (Ballais, 2006; Lelièvre *et al.*, 2008; Masson, 1993). Toute inondation qui marque l'opinion publique constitue une opportunité supplémentaire de procurer davantage de visibilité à la méthode. La diversité des milieux physiques dans lesquels se situent les retours est bénéfique à leur valorisation.

L'utilisation réglementaire de la cartographie hydrogéomorphologique doit également faire l'objet de communications. Ce point peu évoqué se révèle primordial pour que les acteurs chargés de la réglementation de l'urbanisme en zone inondable ne se trouvent pas démunis face à ce nouveau type d'information géographique. Cette nouvelle méthode de cartographie des zones inondables peut poser des problèmes de compatibilité avec le cadre réglementaire. Deux solutions sont possibles pour aboutir à une compatibilité. La première solution consiste à modifier le cadre réglementaire. La deuxième solution demande une adaptation de la méthode au cadre réglementaire. De ces deux options, la seconde est celle menant au changement le plus rapidement car les étapes à franchir sont moins fastidieuses.

6.1.3.2 Atlas de Zones Inondables et cartographie réglementaire

L'Atlas de Zones Inondables constitue une donnée cartographique « de base » qui conditionne les études suivantes sur l'aléa inondation (Garry *et al.*, 2002). En ce sens, il demeure nécessaire d'effectuer une réflexion sur la légende des AZI hydrogéomorphologiques. C'est ce que le MEDD a entrepris avec la définition de la légende des cartographies hydrogéomorphologiques (MEDD, 2001).

6.1.4 Phase de pilotage

Dans le cas de la cartographie hydrogéomorphologique, cette phase se caractérise essentiellement par l'évaluation de l'adhésion des acteurs concernés par la cartographie hydrogéomorphologique et par l'étude des actions entreprises. L'évaluation du changement doit en particulier prêter attention à la représentation que les professionnels du risque (service de l'État, bureaux d'étude) se font de la cartographie hydrogéomorphologique. Pour assurer l'adhésion à la méthode, il faudrait que l'hydrogéomorphologie sorte de son rôle de substitut « bas de gamme » aux modèles hydrauliques, pour être accepté en tant qu'information utile à la gestion des territoires.

6.2 Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique en France

Les pratiques issues de l'interprétation hydrogéomorphologique se développent en France depuis plus de 30 ans. La standardisation des AZI dans les régions Languedoc-Roussillon et PACA au début des années 2000 permet un essor primordial de l'hydrogéomorphologie (MEDD, 2001). Mais où se situe la cartographie hydrogéomorphologique dans le processus de développement de la cartographie hydrogéomorphologique abordé précédemment ?

6.2.1 La situation de la cartographie hydrogéomorphologique en France dans le processus de développement

En France, la phase d'actionnement des leviers est déjà en cours. Tout d'abord, bon nombre de communications relatent des applications de la méthode (Ballais, 2006; Ballais *et al.*, 2011, 2007, 2005; Garry *et al.*, 2002; Lambert *et al.*, 2000; Masson, 1993; Masson *et al.*, 1996; Penven *et al.*, 2008). De plus, dans le Sud de la France, les AZI hydrogéomorphologiques font partie du paysage de la gestion du risque d'inondation. Enfin, les cartographies hydrogéomorphologiques sont progressivement intégrées dans les PPRI.

Mais la phase d'évaluation du changement fait défaut en tant que vision critique de ce développement. Il manque la phase d'évaluation du changement. Ce travail de thèse constitue une contribution à cette phase. L'évaluation des changements opérés nous conduit à envisager différentes évolutions.

6.2.2 Evolutions envisageables

Trois évolutions majeures s'imposent. En premier lieu, une diversification des pratiques cartographiques semble nécessaire. Il s'agit de ne plus concevoir la cartographie hydrogéomorphologique avec une forme unique. Mais d'adapter le rendu cartographique et les informations qu'il contient en fonction du public visé ou des utilisations potentielles. Dans un deuxième temps, la communication autour de l'approche hydrogéomorphologique ne doit pas être centrée sur des aspects géomorphologiques et techniques. La communication doit également s'orienter vers l'aspect opérationnel de la méthode et notamment son intégration dans des PPRI. Enfin, l'interprétation hydrogéomorphologique ne doit plus être cantonnée aux milieux méditerranéens.

6.2.2.1 Diversification des outils cartographiques

La simplification des AZI (chapitre 5) apparaît comme une priorité. Elle permettrait d'améliorer la communication autour de l'aléa inondation. Leur construction en tant qu'information géographique et non comme carte constitue un atout pour leur utilisation postérieure dans des PPRI.

Le MNZI constitue un changement d'outil cartographique. Il permet à partir d'une interprétation hydrogéomorphologique de produire des cartes de hauteur d'eau qui peuvent notamment être employées dans le cadre de PPRI. Le MNZI représente également une réponse directe au besoin de cartographie de hauteurs d'eau édictée par la « Directive Inondation ».

Dans une perspective d'aménagement du territoire, la cartographie positive prend toute son importance. Elle permet, si un territoire le nécessite, de mettre en valeur l'interprétation hydrogéomorphologique afin d'évaluer les potentialités de développement.

6.2.2.2 Diffusion des pratiques réglementaires

Les actions de communication traitant de cartographie hydrogéomorphologique insistent beaucoup sur l'aspect technique et très peu sur les utilisations potentielles. Les pratiques réglementaires développées par les services techniques de l'Etat doivent faire l'objet de communication. Il faut réduire le fossé entre les territoires pour lesquels l'hydrogéomorphologie fait partie intégrante des outils employés dans les PPRI et ceux où l'hydrogéomorphologie n'est qu'une méthode expérimentale. Les pratiques telles que l'aléa résiduel (Sud de la France), les formes de MNZI (Bassin Parisien), ou encore l'utilisation des AZI pour la construction de modèles hydrauliques. Toutes ces pratiques innovantes existent déjà, mais il devient primordial de les mettre en avant.

6.2.2.3 Diversification des milieux naturels

La cartographie hydrogéomorphologique reste associée aux cours d'eau méditerranéens. Mais les expérimentations menées hors de ce milieu (chapitre 3), ainsi que l'analyse du niveau de confiance (chapitre 4) montrent que l'extension de l'approche hors du contexte méditerranéen est possible. Le développement de l'hydrogéomorphologie est en grande partie conditionné par la survenue de crues extrêmes récentes. Collombat (2012) détourne l'adage « gouverner, c'est prévoir » en précisant qu'en matière de risque inondation, « gouverner, c'est d'abord réagir [...] puis oublier ». La diversification des milieux d'application de l'hydrogéomorphologie serait un moyen efficace de faire mentir ce constat cruel.

6.2.2.4 Approche naturaliste contre culte du chiffre

Au moment de promouvoir la cartographie hydrogéomorphologique, sa complémentarité avec des modélisations hydrauliques est souvent invoquée (Ballais *et al.*, 2011; Chave, 2003; Delgado, 2006; Garry *et al.*, 2002). La compatibilité technique entre les deux approches cache un aspect sociologique jamais présenté. La cartographie hydrogéomorphologique a été développée par des universitaires et aujourd'hui largement pratiquée par des personnes qui ont suivi un cursus de géographie. Les modélisations hydrauliques demeurent l'apanage des personnes issues d'écoles d'ingénieurs. La confrontation entre les deux méthodes correspond donc également à la rencontre de deux groupes sociaux qui ne possèdent pas le même capital symbolique (Bourdieu, 1989). Encore aujourd'hui, des discussions autour de la cartographie hydrogéomorphologique peuvent faire sourire un hydraulicien.

Tant que cette violence symbolique (Bourdieu et Passeron, 1970) perdurera, la cartographie hydrogéomorphologique conservera son rang inférieur, telle une « modélisation hydraulique du pauvre ».

6.3 Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique dans de nouveaux contextes environnementaux et règlementaires : l'exemple du Québec

La réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques et de MNZI sur les rivières Matane et Richelieu (chapitre 3) nous permet de tirer quelques enseignements. L'interprétation hydrogéomorphologique est possible à condition de prendre en considération les incertitudes liées à la glacio-isostasie. La comparaison entre la crue de 2011 à Saint-Jean-sur-Richelieu et l'extension du MNZI constitue une preuve supplémentaire de la validité de la méthode, même pour les cours d'eau à crue lente.

Mais comme nous l'avons évoqué à plusieurs reprises dans cette thèse, la cartographie hydrogéomorphologique ne se résume pas à des questions géomorphologiques. En nous appuyant sur des résultats obtenus précédemment nous proposons d'évaluer les perspectives de développement de l'approche hydrogéomorphologique au Québec.

Après un état des lieux du développement institutionnel de l'approche hydrogéomorphologique au Québec, nous évoquons la compatibilité entre la cartographie hydrogéomorphologique et la réglementation de l'urbanisme en zone inondable, encadrée par la PPRLPI (Politique de Protection des Rives, du Littoral et des Plaines inondables).

6.3.1 La cartographie hydrogéomorphologique au Québec

Aujourd'hui, le développement de l'approche hydrogéomorphologique a déjà débuté au Québec. Il se situe à mi-chemin entre la phase de diagnostic et d'actionnement des leviers. Les expérimentations menées à Rivière-au-Renard (Lelièvre *et al.*, 2008), sur la rivière Matane (Demers *et al.*, 2012; Olsen *et al.*, 2011) ainsi que sur des cours d'eau du Sud du Québec (Biron *et al.*, 2013) procurent de la visibilité à la méthode. Mais l'hydrogéomorphologie ne fait pas encore l'objet de pratiques bien définies. La cartographie des zones inondables menées pour le compte de la MRC de Bonaventure correspond à la première cartographie dont les objectifs sont de règlementer l'urbanisme en zone inondable (Marchand *et al.*, 2013b).

Dans optique de pérenniser l'interprétation hydrogéomorphologique certaines actions deviennent indispensables. Tout d'abord la comparaison entre des crues historiques et des cartographies hydrogéomorphologiques doit se poursuivre. Le retour d'expérience à Rivière-au-Renard (Lelièvre *et al.*, 2008) ainsi que la comparaison avec la crue de la rivière Richelieu (chapitre 3) inscrivent un peu plus l'hydrogéomorphologie dans la réalité. Toute inondation marquante peut servir à mettre en avant

la validité de la cartographie hydrogéomorphologique. Cela pourrait être le cas des inondations à répétition de la rivière Lorette près de Québec. Après une nouvelle inondation de quartiers résidentiels en 2013, le désespoir des habitants a fortement cristallisé l'opinion publique⁸⁸. Ces inondations n'ont pour l'instant pas fait l'objet d'une publication. Pour connaître un essor, la cartographie hydrogéomorphologique doit s'inscrire dans l'actualité.

Il n'existe aujourd'hui qu'un seul type de cartographie des zones inondables au Québec. Ce sont les cartes produites à des fins règlementaires, dans le cadre de la PPRLPI (Gouvernement du Québec, 2005). Afin de produire des cartographies cohérentes sur le plan méthodologique, il serait pertinent de prévoir la réalisation d'AZI sur des bassins versants entiers, ou sur des ensembles de cours d'eau. Un cahier des charges cartographique serait un atout (MEDD, 2001). Avant d'établir une cartographie standardisée, la caractérisation des incertitudes et des imprécisions liées à la spatialisation des zones inondables doivent être approfondies.

6.3.2 Compatibilité entre la législation québécoise et l'approche hydrogéomorphologique

Deux principales solutions sont possibles pour intégrer l'interprétation hydrogéomorphologique dans la gestion de l'urbanisme en zone inondable au Québec. La première consiste à adapter la cartographie hydrogéomorphologique aux termes de la PPRLPI. La deuxième comprend une modification du cadre législatif, sur le modèle des PPRI français. Avant d'étudier les possibilités qui s'offrent à l'hydrogéomorphologie, nous présentons les caractéristiques de la législation québécoise et ses différences majeures avec les PPRI français.

6.3.2.1 La réglementation de l'urbanisme en zone inondable au Québec

Dans la province, ce sont les MRC (Municipalités Régionales de Comté) qui ont la responsabilité de légiférer sur l'urbanisme en zone inondable. Elles doivent s'appuyer sur la PPRLPI⁸⁹ pour connaître les réglementations liées.

La définition de l'aléa est habituellement confiée au CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec), qui dépend lui-même du MDDEFP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs). Deux classes d'aléa sont demandées dans la PPRLPI : la zone de grand courant est « inondée lors d'une crue de récurrence 20 ans » et la zone de faible courant est « inondée lors d'une crue de récurrence de 100 ans ». Notons qu'il existe un décalage entre la dénomination des

⁸⁸ Le Soleil. *Le Soleil, édition internet* (en ligne), 2013. (<http://www.lapresse.ca/le-soleil/actualites/environnement/201306/06/01-4658260-inondations-a-lancienne-lorette-les-sinistres-se-vident-le-coeur.php>). Consulté le 03/02/14.

⁸⁹ Gouvernement du Québec, 2005. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R35.HTM

classes d'aléa et leur définition. En effet, les termes « grand courant » et « faible courant » font référence à l'amplitude de l'inondation. En revanche, les crues de récurrence 20 et 100 ans correspondent à la fréquence d'une inondation. Ces zones sont obtenues à partir de modélisations hydrologiques et hydrauliques et se présentent sous la forme de surfaces homogènes dont les limites externes sont inférieures aux zones inondables déterminées par approche hydrogéomorphologique de la rivière Matane (chapitre 3, figure...) et très proches pour la rivière Richelieu (chapitre 3, figure...).

Les zones de grand courant et de faible courant ont chacune des règles d'urbanisme associées qui ont pour objectif « d'assurer la sécurité des personnes et des biens ». La zone de grand courant est caractérisée par de nombreuses interdictions pour les constructions, ainsi que des possibles dérogations. La zone de faible courant est moins restrictive pour les nouvelles constructions sous réserve qu'elles soient « immunisées ». Cette réduction de la vulnérabilité du bâti consiste essentiellement à des rehaussements du rez-de-chaussée sur des remblais.

6.3.2.2 Différences entre l'application de la PPRLPI et de PPRI

La première différence correspond au nombre de cartes utilisées dans chacun des documents. Un PPRI classique comporte une carte d'aléa (croisement hauteur / vitesse) et une carte d'enjeux qui combinées produisent le zonage règlementaire (Garry et Graszak, 1999). Dans le cadre de la PPRLPI, seule la carte représentant les zones de grand courant et de faible courant est demandée. Dans les faits, la complexité d'un zonage règlementaire provient essentiellement de l'importance des enjeux concernés. Le PPRI de Nîmes⁹⁰ comporte par exemple 20 zones règlementaires issues du croisement de 5 classes d'enjeux et 4 classes d'aléa. A l'opposé le PPRI de l'Yonne⁹¹ dans le département de la Nièvre se situe dans un contexte plus rural et ne comporte que 3 zones règlementaires.

6.3.2.3 Représentation des zones de grand courant et de faible courant : exemple de la rivière Bonaventure

Le texte de loi de la PPRLPI associe les récurrences de 20 et 100 ans aux zones de grand courant et de faible courant. Mais pour certains territoires présentant peu d'enjeux, la réalisation d'un modèle hydraulique représente un investissement disproportionné. De nombreux cours d'eau ne disposent que d'une délimitation des zones inondables réalisées au « pinceau large ». Cette cartographie ne présente aucun guide méthodologique. Elle est citée par le CEHQ⁹² (Centre d'Expertise Hydrique du Québec) comme la « méthode la plus élémentaire » issue de différentes sources historiques qui attestent de l'inondation. Ce type de cartographie ne permet pas de distinguer des niveaux d'intensité, ni de fréquence d'aléa. Bien que peu documentée, l'approche est citée dans de nombreux documents

⁹⁰ DDTM du Gard, 2012. Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI). Commune de Nîmes. Rapport de présentation du PPRI

⁹¹ DDE de la Nièvre, 2008. Plan de Prévention du Risque Inondation de l'Yonne. Secteur de Corbigny. Note de présentation. 31 p.

⁹² CEHQ, Informations générales, <http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/>. Consulté le 13/01/2014

produits par des localités. La MRC de Matawinie⁹³ ou encore la MRC de Portneuf⁹⁴ citent la méthode dans le cadre de documents liés à l'aménagement de leur territoire.

La rivière Bonaventure qui s'écoule dans la ville du même nom ne possède jusqu'en 2013 qu'une cartographie au « pinceau large ». Afin d'y remédier, la ville commande directement une étude au laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR (Marchand *et al.*, 2013b). L'objectif principal de l'étude consiste à produire une cartographie des zones inondables utilisable dans le cadre de la PPRLPI. La cartographie doit être produite à partir d'une analyse hydrogéomorphologique.

Afin de cartographier les zones de grand et de faible courant, l'auteur réalise un MNZI qui repose sur une analyse des zones inondables par approche hydrogéomorphologique. Les observations réalisées sur un MNT LiDAR et grâce à des expertises de terrain sont complétés par des informations historiques. Les expérimentations menées sur la rivière Matane constituent des références scientifiques pour l'interprétation hydrogéomorphologique (Demers *et al.*, 2012; Montané *et al.*, 2014; Olsen *et al.*, 2011).

Le résultat de l'étude est une cartographie réalisée sur 13 km de linéaire (Figure 123). La fréquence de submersion élevée d'une grande partie de la rivière Bonaventure explique que la grande majorité de la zone inondable soit classé en « grands courants ». A la vue de la cartographie des zones inondables, la représentation du « pinceau large » montre une certaine correspondance. Cette correspondance prodigue de la légitimité aux deux approches. La cartographie hydrogéomorphologique n'est donc pas dénuée de sens et permet de mieux qualifier l'aléa. Le « pinceau large » n'est sans doute pas dénué de sens et mériterait que sa méthodologie devienne davantage explicite.

⁹³ http://www.mrcmatawinie.org/upload/File/Le_Tributaire_vol_1_no_1.pdf. Consulté le 22/04/2014

⁹⁴ <http://mrc.portneuf.com/upload/mrc.portneuf/editor/asset/SAD%20-%20CHAPITRE%207.pdf>. Consulté le 22/04/2014

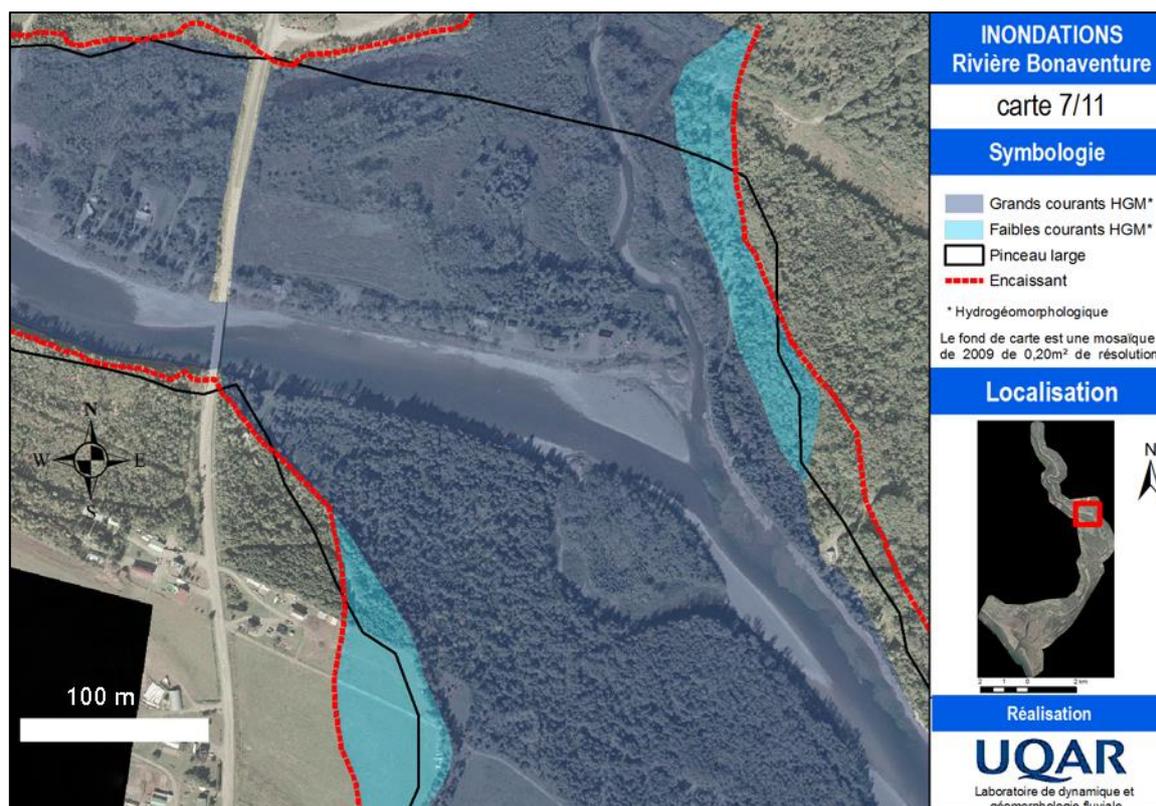


Figure 123 : Cartographie des zones de grand courant et de faible courant par approche hydrogéomorphologique (modifié d'après Marchand *et al.*, 2013)

La cartographie réalisée sur la rivière Bonaventure constitue la première application de l'approche hydrogéomorphologique au Québec à visée réglementaire. Elle présente également l'avantage de correspondre au cadre réglementaire établi par la PPRLPI.

6.3.2.4 Proposition d'application d'une réglementation de l'occupation du sol pour la PPRLPI à partir de la cartographie hydrogéomorphologique

L'exemple de la rivière Bonaventure présentait l'avantage de ne pas remettre en question le cadre réglementaire. Sans présumer de l'évolution de la gestion du risque inondation au Québec, nous proposons de visualiser ce que comporterait l'application d'un PPRI sur un autre cours d'eau québécois.

Le zonage réglementaire proposé (Tableau 15) montre une adaptation de la vision classique des PPRI français au contexte québécois en s'inspirant des différents guides techniques de ministères français (Garry et Grasz, 1999; MEDD, 2006). Ces guides prévoient notamment une plus grande sévérité de la réglementation dans les zones rurales que dans les zones à enjeux. En plus de ce découpage classique, nous intégrons l'aléa résiduel mis en avant par certains des PPRI du Sud de la France, comme par exemple le PPRI de la Cèze⁹⁵.

⁹⁵ DDTM du Gard, 2011. Plan de Prévention des Risques Inondation de la Cèze. Rapport de Présentation. 102 p.

	Zone de grand courant ou MNZI > 1 m	Zone de faible courant ou MNZI compris entre 0,5 et 1 m	MNZI < 0,5 m	Zone inondable HGM indifférenciée (affluents, cônes alluviaux)
Zone non urbaine	R	R	R	R
Zone urbaine	R	B1	B2	B1

Tableau 15 : Proposition de zonage réglementaire du PPRI de la rivière Matane

Le zonage proposé permet de conserver les termes de « grand courant » et « faible courant ». Ces deux classes d'aléa peuvent être remplacées par des classes de hauteur d'eau du MNZI déjà réalisé sur le cours d'eau. Nous ajoutons deux classes d'aléa supplémentaires. La première est similaire à l'aléa résiduel des PPRI français (chapitre 2). La deuxième classe comprend les zones inondables des affluents et les débordements sur cône torrentiel. Notons que dans ce type de zonage, la simplification de la cartographie hydrogéomorphologique aurait également sa place. Elle permettrait notamment de mettre en valeur la zone d'écoulement dynamique, en particulier pour les affluents, où la réalisation d'un MNZI ne présente pas d'intérêt.

La zone « R » (Rouge) se caractériserait par des interdictions de nouvelles constructions ou d'aménagement. Il serait envisageable de définir un zonage réglementaire « rouge » moins sévère pour les portions externes du lit majeur (niveau3). Les deux zones bleues, B1 et B2 correspondraient essentiellement à des prescriptions sur les nouvelles constructions. Le développement urbain reste possible à condition de respecter certaines normes liées qui permettent de réduire la vulnérabilité du bâtiment. Le zonage B1 est plus sévère que le zonage B2.

L'extrait de la cartographie finale (Figure 124) est centré sur la ville de Saint-René-de-Matane. Il montre à quel point le découpage des zones d'enjeux reste primordial. La majorité des zones inondables est classée en « zone sans enjeu » et comporte donc un zonage « rouge » caractérisé essentiellement par des interdictions.

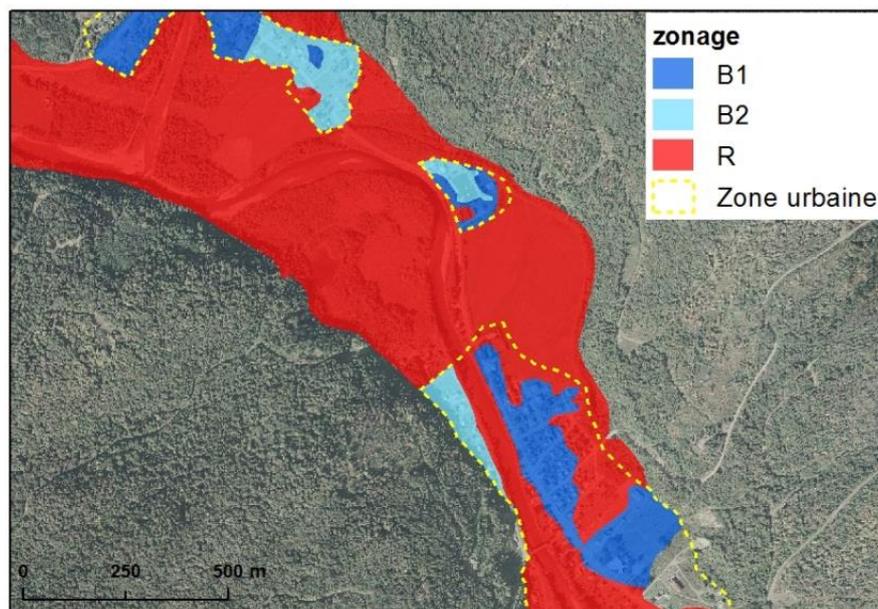


Figure 124 : Zonage réglementaire à Saint-René-de-Matane

Les classes proposées ne correspondent pas à un modèle universel. Elles permettent d’envisager la gestion de l’urbanisme en zone inondable au Québec de manière différente. Les valeurs retenues pour définir les classes sont fournies à titre d’exemple.

6.3.3 Développement de la cartographie hydrogéomorphologique au Québec : éléments de conclusion

La cartographie hydrogéomorphologique au Québec se situe à un tournant. Elle est en passe d’évoluer d’une méthode mise en avant par des universitaires (Biron *et al.*, 2013; Demers *et al.*, 2012, 2012; Lelièvre *et al.*, 2008), à une approche employée dans un cadre réglementaire précis (Marchand *et al.*, 2013b).

Dans l’optique de développer la cartographie hydrogéomorphologique au Québec, il serait opportun de définir précisément les aspects de la méthode à redéfinir. Tout d’abord, l’approfondissement scientifique doit continuer, en particulier pour la question des incertitudes liées à la glacio-isostasie. Il reste également à évaluer si l’aléa érosion peut être intégré à la cartographie, afin de prendre en compte les aléas fluviaux de manière plus large. Le terme de « cartographie hydrogéomorphologique » peut également être remplacé par l’acronyme « HGM » de manière plus courante, tel que cela est visible dans plusieurs publications (Demers *et al.*, 2014; Marchand *et al.*, 2013b).

Les premières réalisations de cartographies hydrogéomorphologiques pourraient être des cartographies réalisées sur des tronçons de rivières qui ont connu des inondations durant les dernières années. Sans proposer de légende complexe composée de plusieurs niveaux alluviaux, la simple production d’un shapefile correspondant aux zones inondables et la comparaison avec des zones inondées serait un

argument de poids en faveur de la méthode. Il serait également pertinent de réaliser des AZI qui constitueraient l'élément central du développement de la cartographie hydrogéomorphologique au Québec. Il sera également utile pour la diffusion de la méthode, que les cartographies des zones inondables fassent l'objet d'une communication plus aboutie, par exemple via la mise à disposition du public des AZI. Tel que débuté avec l'étude de la rivière Bonaventure (Marchand *et al.*, 2013b), la cartographie hydrogéomorphologique pourra être proposée en priorité à des municipalités rurales. Il serait également pertinent de présenter la cartographie hydrogéomorphologique comme une cartographie au « pinceau large » améliorée. S'appuyer sur des méthodes existantes constituerait un gage de réussite supplémentaire.

Au-delà de la prise en considération des caractéristiques physiques des cours d'eau du Québec, il semble primordial de prendre en compte le contexte urbain, bien différent de la France. La faible densité de population ne rend pas pertinent de réaliser des AZI sur des bassins versants entiers. De plus, la pression foncière plus faible sur les zones inondables pourrait permettre une réglementation plus « souple » que celles engendrées par les PPRI français. La réalisation d'AZI sur des bassins versants entiers, présenterait la couverture d'une grande superficie de zones inondables sans aucun enjeu.

Aujourd'hui, le développement de la cartographie au Québec comporte davantage de questions que de réponses. Ces questions concernent la validité de la méthode, la compatibilité avec le cadre réglementaire en place ou tout simplement les formes que la cartographie hydrogéomorphologique peut prendre dans la province. Dans ce contexte, le schéma du développement (Figure 122, page 213) de la cartographie hydrogéomorphologique proposé permet de prendre du recul sur la place qu'occupe la méthode et sur les prochaines étapes nécessaires à son développement.



Conclusion générale

Jusqu'à aujourd'hui, la plupart des travaux relatifs à la cartographie hydrogéomorphologique traitent d'aspects techniques et géomorphologiques (Ballais *et al.*, 2011; Chave, 2003, 2002; Delgado, 2006; Demers *et al.*, 2014; Garry *et al.*, 2002; Masson *et al.*, 1996). Cela s'explique par la volonté de démontrer la fiabilité de la méthode pour cartographier l'aléa inondation. En France, la cartographie hydrogéomorphologique prend progressivement plus d'importance. Au début des années 1980, elle était une méthode expérimentale testée sur des cours d'eau du Sud de la France. Trente ans plus tard elle est employée dans des PPRI pour cartographier l'aléa inondation.

Ce travail n'est pas focalisé sur la fiabilité de la cartographie hydrogéomorphologique. L'objectif principal était de proposer une mise en perspective de l'ensemble de la méthode. Après 25 ans d'utilisation, une relecture de la méthode à l'aune des nouvelles contraintes réglementaires, des règles cartographiques et des données géomorphologiques constitue un élément clé pour comprendre, puis proposer des évolutions aux pratiques liées à la cartographie hydrogéomorphologique. L'objectif sous-jacent de ce travail restait de démontrer que l'approche hydrogéomorphologique constitue une méthode utile à la connaissance de l'aléa et à la gestion du risque inondation.

Cette étude comporte plusieurs échelles de travail selon les problématiques explorées. L'analyse des aspects réglementaires de l'hydrogéomorphologie en France nécessita d'emprunter une échelle nationale. Puis la réalisation des MNZI introduit des échelles locales plus appropriées aux études de cas interrogeant les améliorations techniques possibles de la méthode.

◆ Représentation, usages et compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique

Il serait pour le moins présomptueux d'affirmer que la cartographie hydrogéomorphologique a été « inventée » en France. Les fondements scientifiques de la méthode se retrouvent dans de nombreux travaux à travers le monde (Baker, 1994, 1976; Demers *et al.*, 2014; Fernández-Lavado *et al.*, 2007; Leopold *et al.*, 1964; Mascareñas i Rubiés, 2012; Wulamu *et al.*, 2013). La particularité française est d'avoir réussi à faire le lien entre des connaissances géomorphologiques communes à la quasi-totalité des géomorphologues et la nécessité de cartographier des zones inondables. La compréhension de l'intégration de la cartographie hydrogéomorphologique dans les pratiques de gestion du risque inondation en France constitue un élément primordial pour prévoir le développement futur de l'approche dans d'autres contextes institutionnels.

La représentation que se font les services techniques de l'État de la cartographie hydrogéomorphologique reste en adéquation avec les différents guides méthodologiques (Ballais *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 1996). Le faible coût d'une cartographie hydrogéomorphologique et sa représentation maximisante des zones inondables restent les atouts les plus cités. En revanche, une majorité des services de l'État interrogés met en avant l'incompatibilité de la méthode avec le cadre réglementaire d'un PPRI. L'absence de hauteurs d'eau et surtout de cote de crue provoque cette réserve de la part des services de l'État. Les DDT du Midi méditerranéen se distinguent en intégrant la méthode à l'élaboration des zonages réglementaires des PPRI.

Ce clivage se retrouve dans l'analyse des PPRI. La majorité des PPRI étudiés (64 %) n'emploient pas du tout de cartographie hydrogéomorphologique. Cependant, il existe une propension de plus en plus

grande des services de l'État à se servir de l'approche hydrogéomorphologique. Cette augmentation progressive de l'utilisation de l'hydrogéomorphologie peut s'expliquer par une diffusion progressive de la méthode au sein des services instructeurs, de la proposition de la méthode par des bureaux d'étude, mais aussi par une tendance à diversifier les informations relatives à l'aléa inondation. Dans des départements de l'arc méditerranéen, l'intégration de l'hydrogéomorphologie dans les documents réglementaires correspond à une pratique institutionnelle solidement ancrée. Le concept d'aléa résiduel représente l'aspect le plus probant de l'adoption des cartographies hydrogéomorphologiques. En s'affranchissant de la principale limite de l'hydrogéomorphologie, l'absence de cote de crue, les DDT proposent une réglementation particulière des zones urbaines uniquement concernées par l'hydrogéomorphologie. Les règlements de PPRI prévoient des interdictions de construire pour les établissements sensibles et utiles à la gestion de crise, ainsi que des prescriptions de hauteur de premier plancher pour les habitations. L'analyse des PPRI a fait ressortir un point important concernant le développement de la cartographie hydrogéomorphologique. La survenue récente de crues extrêmes constitue un élément déterminant dans le positionnement du risque inondation au cœur des préoccupations des populations et des décideurs.

La compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique est abordée à partir d'un questionnaire adressé à plus de 100 personnes non expertes. Nous tirons des conclusions sur les difficultés d'interprétation d'une cartographie hydrogéomorphologique. La majorité des personnes interrogées parvient à situer les zones inondables. Néanmoins les unités de l'encaissant et en particulier les terrasses alluviales représentent une source de confusion sur la délimitation correcte des zones inondables.

L'analyse du contenu d'un AZI hydrogéomorphologique tel que pratiqué en région PACA et Languedoc-Roussillon fait apparaître d'autres points négatifs. En premier lieu, la légende des AZI est très riche, mais la majorité des figurés n'apparaissent pas dans les cartes finales. De plus les AZI ne sont pas conçus comme une information géographique, mais comme des cartes. A ce titre, de nombreuses tables SIG « d'habillage » ne seront jamais réutilisées par la suite dans le cadre de PPRI. La cartographie hydrogéomorphologique possède également la caractéristique de représenter des formes. Celles-ci sont instinctivement associées à des processus pour un géomorphologue, mais elles possèdent peu de signification pour des personnes non expertes. Enfin la représentation des incertitudes et des imprécisions n'est pas transparente. La cartographie de colluvions signifie de manière détournée que le géomorphologue rencontre des difficultés à localiser la limite de zone inondable. Là encore, si le lecteur n'est pas expert, il ne peut comprendre la signification du figuré cartographique. La cartographie hydrogéomorphologique doit évoluer pour être plus facilement utilisable dans le cadre de documents réglementaires et pour communiquer plus efficacement autour des zones inondables. C'est ce que nous envisageons à travers le chapitre 5, qui porte en partie sur la simplification des AZI.

Ces résultats soulignent à quel point il existe en France de grandes disparités sur l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique. La mise en valeur des lacunes cartographiques de l'approche hydrogéomorphologique a constitué un apport majeur de la thèse et a permis d'orienter de manière pertinente la suite du travail de recherche.

◆ La cartographie hydrogéomorphologique ne doit pas être réservée aux cours d'eau méditerranéens

Avant de débiter ce travail, nous savions par expérience que la cartographie hydrogéomorphologique était surtout développée dans les territoires du Midi méditerranéen. Après avoir analysé ce développement dans le chapitre 2, la volonté de démontrer l'applicabilité de la méthode dans des contextes morphoclimatiques variés s'impose comme une évidence.

Pour cela, trois cours d'eau hors du contexte méditerranéen sont choisis en France (Meurthe) et au Québec (Matane et Richelieu). La première étape de la réalisation de MNZI consiste en une cartographie des zones inondables. La Meurthe et surtout la rivière Richelieu correspondent à des cours d'eau à crue lente pour lesquels la cartographie hydrogéomorphologique est réputée peu adaptée. A cette occasion nous avons pu constater deux points importants. Tout d'abord la localisation de la limite de zone inondable reste possible pour ces cours d'eau, à condition de réévaluer les seuils de rupture de pente servant à les repérer. Ensuite, l'utilisation des MNT LiDAR pour l'étude de ces cours d'eau devient inéluctable. Ils permettent d'identifier des formes telles que des glacis d'épandage et des zones de colluvionnement à la pente transversale parfois inférieure à 1 %.

La diversité physique des sites d'expérimentations des MNZI nous amène à nous demander quels sont les paramètres qui influencent le niveau de confiance d'une cartographie hydrogéomorphologique. Ce niveau de confiance correspond à la fusion des erreurs liées à l'incertitude et à l'imprécision de l'interprétation hydrogéomorphologique. L'incertitude provient de l'anthropisation des plaines alluviales et de l'évolution rapide du profil en long d'un cours d'eau, liée par exemple au phénomène de glacio-isostasie. L'imprécision est tout d'abord influencée par l'énergie caractéristique de la plaine alluviale. Les cours d'eau présentant une faible énergie rendent l'interprétation particulièrement imprécise. La présence d'une lithologie friable génère elle aussi des imprécisions. Il existe effectivement des différences quant au niveau de confiance accordé à une cartographie hydrogéomorphologique, en fonction du milieu physique. Mais celles-ci ne sont pas réduites à une opposition entre les cours d'eau méditerranéens et les autres cours d'eau. La réalité est bien plus complexe. Il demeurera toujours plus évident de réaliser une cartographie des zones inondables dans un cours d'eau à énergie moyenne du Nord de la France que dans une basse plaine côtière bordant la mer Méditerranée. Le développement plus prononcé de pratiques liées à l'hydrogéomorphologie dans le Midi méditerranéen ne peut en aucun cas être uniquement lié à des caractéristiques physiques. L'apport des MNT LiDAR pour réduire les incertitudes et les imprécisions est indéniable. Notons qu'une partie des incertitudes pourraient se réduire à l'avenir, si les mécanismes reliant l'évolution du profil en long d'un cours d'eau et l'inondabilité de son lit majeur sont approfondis. Des retours post catastrophes semblent appropriés dans ces cas de figure.

La réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques hors du milieu méditerranéen et la mise en avant des paramètres qui influencent le niveau de confiance nous permettent d'affirmer que l'interprétation hydrogéomorphologique est pertinente dans d'autres contextes physiques.

◆ Une diversification cartographique nécessaire

Afin de pérenniser l'interprétation hydrogéomorphologique, il devient nécessaire d'envisager différentes versions de cartographies en fonction des utilisations envisagées. Dans cette hypothèse, la cartographie hydrogéomorphologique telle que pratiquée dans le Midi méditerranéen garde une place primordiale. Elle permet au géomorphologue de comprendre le fonctionnement de la plaine alluviale, mais elle ne correspond plus à un résultat final. La cartographie hydrogéomorphologique fait partie de la sphère de la réflexion et de l'expertise (Di Biase, 1990).

La réalisation d'un MNZI fut dans un premier temps une réponse directe au texte de la « Directive Inondation⁹⁶ ». La directive demande de cartographier des hauteurs d'eau pour une « crue de faible probabilité » ou un « scénario d'évènement extrême », appelés aujourd'hui par un large consensus « crue extrême ». Il existe une méthode expérimentale testée dans le cadre de PPRI du Bassin Parisien et nommée MNZI⁹⁷ (Guéro et Willmes, 2009; Guéro *et al.*, 2008). Cette méthode qui vise à croiser un MNT et une ligne d'eau déterminée par approche hydrogéomorphologique constitue une solution pour combler la principale lacune de l'hydrogéomorphologie mise en valeur par les DDT, à savoir l'absence de cote de crue.

Sur le plan technique, la réalisation de MNZI profite largement du saut technologique que représentent les MNT LiDAR. Leur résolution et leur précision altimétrique accrue permettent de cartographier des hauteurs d'eau dont l'aspect rappelle les formes d'une plaine alluviale. Dans la mesure où une cartographie hydrogéomorphologique est réalisable et qu'un MNT à résolution optimale pour la largeur du cours d'eau est disponible, aucun obstacle particulier ne se dresse contre la réalisation d'un MNZI.

Par le biais des hauteurs d'eau, les MNZI permettent une meilleure vision de ce que représente une inondation d'un lit majeur en entier. Cette cartographie s'avère plus pertinente pour les cours d'eau à crue lente, pour lesquels la hauteur d'eau et la durée de submersion constituent les deux variables principale de l'aléa inondation. En revanche, pour les cours d'eau à crue rapide, la prise en compte d'une ligne d'eau linéaire et l'occultation des vitesses d'écoulement s'avère être une lacune.

La question de la correspondance entre un MNZI et la crue extrême de la « Directive Inondation » nécessite une réponse nuancée. La comparaison de MNZI avec des crues millénales et des crues historiques extrêmes (Meurthe, Gardon, Richelieu) montre à chaque fois l'aspect maximisant du MNZI, héritage légitime de l'interprétation hydrogéomorphologique. En revanche, d'un point de vue altimétrique, il reste possible de présenter un scénario de crue supérieur qui ne remet pas en cause l'emprise du MNZI.

La prise en compte de l'hydrogéomorphologie pour représenter la crue extrême dépend grandement de choix méthodologiques réalisés par les gestionnaires du risque inondation. Si ceux-ci privilégient la récurrence de crue pour la crue extrême, c'est bien une crue millénaire modélisée qui s'impose. Au contraire, s'ils privilégient l'emprise de la crue extrême reposant sur des caractéristiques physiques, le MNZI possède davantage de chances.

⁹⁶ Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Journal officiel de l'Union européenne du 06/11/2007. ([lien](#))

⁹⁷ DDE du Calvados, 2008. Plan de Prévention des Risques d'Inondation de la basse vallée de l'Orne. Règlement. 28 p.

DDT de l'Essonne, 2012. Plan de Prévention des Risques Naturels. Risque inondation de la vallée de l'Essonne dans les départements du Loiret, de Seine-et-Marne et de l'Essonne. Notice de Présentation. 53 p.

Parce qu'il n'est ni techniquement ni financièrement réalisable de produire des MNZI sur des bassins versants entiers, la réalisation d'AZI présentant des informations qualitatives reste indispensable. La simplification des AZI entreprise dans le chapitre 5 propose des grands axes d'évolution pour aboutir à une carte plus rapide à réaliser, conçue comme une information géographique et permettant une meilleure compréhension de l'aléa inondation. La version simplifiée des AZI concentre toute l'information utile à la compréhension des zones inondables dans une seule table SIG. Cette cartographie des zones inondables est centrée sur les processus et non sur les formes visibles sur le terrain. Par exemple, les lits moyens et les axes d'écoulement en lit majeur sont fusionnés au sein de l'entité zone d'écoulement dynamique. Ce recentrage sur la zone inondable entraîne la suppression des unités de l'encaissant et des types de talus. Par ailleurs, soulignons que la terminologie « hydrogéomorphologie » peut entraîner des quiproquos sur son sens selon les auteurs. Afin d'éviter des confusions avec des études portant sur les « formes terrestres engendrées par l'action de l'eau » (Scheidegger, 1973), il serait par exemple possible d'attribuer le terme de CHZI (Cartographie Hydrogéomorphologique des Zones Inondables) dès lors que celle-ci possède pour objectif d'être intégrée dans une politique de gestion du risque d'inondation.

Dans une optique d'aménagement du territoire, l'identification des unités hydrogéomorphologiques, y compris celles de l'encaissant, conservent tout leur intérêt. A travers le concept de cartographie positive, nous montrons de quelle manière la vision d'un géomorphologue et d'un aménageur peuvent se combiner. Cette méthode cherche à mettre en valeur les atouts des zones inondables tout en acceptant les contraintes qu'elles induisent. Cette approche peut s'avérer utile en amont de l'établissement de schémas d'urbanisme, en tant qu'outil d'aide à la décision. Cet outil présenterait les grandes problématiques auxquelles est confronté un aménagement de zones inondables.

Ces résultats montrent à quel point la diversification de la cartographie hydrogéomorphologique devient indispensable à son expansion. Le MNZI répond aux exigences de la « Directive Inondation » concernant la crue extrême et favorise l'intégration de l'hydrogéomorphologie au sein des PPRI.

◆ L'intérêt de la vision transversale pour le développement de l'approche hydrogéomorphologique

Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique dans un territoire nécessite de définir des étapes précises pour transformer une approche validée par des géomorphologues en un ensemble de pratiques participant à la gestion du risque inondation. Les étapes identifiées s'inspirent de méthodologies développées par les sciences de gestion visant à pérenniser des changements institutionnels (Autissier et Moutot, 2007). L'objectif de la conduite du développement de la cartographie hydrogéomorphologique est d'augmenter au fil du temps le degré d'adhésion à la méthode, des acteurs du risque inondation.

Le point de départ du développement de la cartographie hydrogéomorphologique est constitué de plusieurs éléments moteurs. Dans les cas de figure étudiés en France, il apparaît clairement que les crues historiques favorisent le développement de l'hydrogéomorphologie, car elles crédibilisent les cartes produites. La faiblesse des enjeux peut également constituer un élément favorable pour l'approche hydrogéomorphologique. Mais l'élément le plus important reste la combinaison entre la

volonté des gestionnaires de développer la méthode et des personnes ressources possédant des connaissances dans le domaine. Une fois décidé le développement de pratiques autour de la cartographie hydrogéomorphologique, intervient la phase de diagnostic. Grâce à une identification des acteurs, des prérequis matériels et du niveau de confiance liés à l'interprétation hydrogéomorphologique, il devient possible d'anticiper les difficultés. La deuxième phase, nommée « leviers du changement » correspond à la mise en pratique. Il faut dans un premier temps prévoir des formations et des communications traitant notamment de retour d'expérience post-crue, des aspects techniques de la réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique, mais aussi de sa possible intégration dans la réglementation du risque inondation. Suite à ces communications, il devient possible de produire des cartes répondant aux attentes des différents acteurs. La dernière phase correspond à l'évaluation du changement. D'un point de vue pratique, cela s'approche des éléments apportés par le chapitre 2 de cette thèse. Il s'agit de comprendre de quelle manière la méthode est prise en compte par différents acteurs du risque et de proposer des évolutions pour tendre vers une plus grande adhésion à la méthode.

A travers la mise en avant d'un modèle de développement de la cartographie hydrogéomorphologique, nous souhaitons affirmer que l'émergence de cette méthode dépend d'une volonté des gestionnaires du risque inondation, à laquelle s'associent les bureaux d'étude et les universitaires qui apportent des réponses techniques à ce développement.

◆ Le développement de l'approche hydrogéomorphologique en France

En France, la cartographie hydrogéomorphologique se situe à l'étape de l'évaluation du changement. Trois grands défis s'imposent à l'hydrogéomorphologie.

Tel qu'évoqué précédemment, la diversification des pratiques cartographiques semble incontournable pour la pérennisation de l'approche. La simplification des AZI ou encore le développement de MNZI serait un atout.

Ensuite, il semble indispensable qu'il y ait une communication plus efficace autour des possibilités d'utilisation réglementaire de l'hydrogéomorphologie. Pour beaucoup de gestionnaires, la méthode reste encore incompatible avec l'application d'un PPRI. La diffusion de la pratique de l'aléa résiduel, des AZI simplifiés et du MNZI constitue l'axe le plus prometteur pour le développement de l'hydrogéomorphologie.

Par ailleurs, dans l'optique de diffuser la méthode au-delà du milieu méditerranéen, il devient primordial de communiquer sur l'adaptabilité de la méthode à des contextes physiques variés.

Aujourd'hui, la « Directive Inondation » a bouleversé la perception de l'aléa de nombreux gestionnaires du risque inondation en considérant par exemple une crue centennale comme une « crue moyenne ». Avant l'application de la directive, cette même crue centennale faisait office d'aléa maximal pour de nombreux acteurs. La « Directive Inondation » soulève des questionnements, en particulier pour le mode de représentation de la crue extrême et les répercussions qu'elle aurait sur les PPRI actuels. L'État français insiste sur l'aspect non réglementaire des cartes de la « Directive Inondation ». Mais gageons qu'il émergera une volonté de prendre en considération ce type d'aléa

dans ces documents réglementaires. Cette crue extrême, comme nous le montre l'analyse des PPRI, peut être prise en compte de deux manières.

La première possibilité consiste à considérer la crue extrême en tant que crue de référence, comme cela est déjà le cas pour une crue centennale ou une crue historique. Cette option paraît intenable vis-à-vis des communes. Il est en effet déjà compliqué de faire accepter les niveaux d'eau d'une crue centennale ; une crue millénaire utilisée en tant qu'aléa de référence serait politiquement et socialement inacceptable. Nous n'évoquons pas la possibilité de prévoir deux cotes de crue différentes car cette configuration n'a pas été rencontrée lors de l'analyse des PPRI.

La deuxième possibilité pour intégrer la crue extrême dans les PPRI serait de s'inspirer de la pratique de l'aléa résiduel, présente dans le Sud de la France. Citons également le cas du PPRI du Grand Lyon⁹⁸ qui emploie une « crue exceptionnelle », correspondant à une crue millénaire, en complément d'une crue de référence historique. Dans les zones urbaines, la crue extrême entraînerait donc principalement des prescriptions sur les nouveaux bâtiments et l'interdiction d'établissements vulnérables ou utiles à la gestion de crise. Dans les zones non urbaines, la crue extrême induirait essentiellement des interdictions. Que la crue extrême corresponde à une crue millénaire ou à une cartographie hydrogéomorphologique, sa prise en compte réglementaire participerait à la réduction de la vulnérabilité des territoires sans pour autant contraindre trop fortement le développement urbain.

◆ Développement de l'approche à l'étranger

Au Québec, le développement de la cartographie hydrogéomorphologique en est à ses débuts. Afin d'évoluer d'une méthode à la portée universitaire vers des pratiques réglementaires, plusieurs étapes doivent être franchies. La question de l'adaptation de la méthode à la glacio-isostasie peut être approfondie. Les communications concernant la méthode pourront s'articuler autour de retours d'expérience et des questions posées par la compatibilité avec le cadre réglementaire québécois.

Le développement institutionnel de l'hydrogéomorphologie hors de France reste un enjeu prégnant. Celle-ci pourra être effective si des gestionnaires et des géomorphologues s'accordent sur des objectifs communs. Les géomorphologues doivent s'intéresser au risque inondation et les gestionnaires du risque inondation à la géomorphologie. Dès lors que les gestionnaires auront à l'esprit que cette méthode est peu onéreuse, qu'elle permet de représenter l'extension maximale des zones inondables et qu'elle peut être compatible avec leur réglementation, celle-ci pourra étendre son influence.

◆ Perspectives

A travers cette thèse, j'espère avoir contribué à la mise en valeur de la cartographie hydrogéomorphologique comme une méthode fiable de cartographie des zones inondables. J'espère aussi avoir démontré que la cartographie hydrogéomorphologique est compatible avec une réglementation de l'urbanisme en zone inondable, à travers la mise en valeur de différentes pratiques au sein de PPRI français. En termes d'évolution de cette cartographie, son avenir se trouve dans la

⁹⁸ Préfecture du Rhône (2008) - *Plan de Prévention des Risques Naturels pour les inondations du Rhône et de la Saône sur le territoire du Grand Lyon*. Note de présentation. Secteur Rhône aval. 27 p.

diversification des approches, avec le MNZI, la simplification des AZI ou la cartographie positive, ainsi que dans la diversification des environnements d'application.

Certains aspects de la thèse mériteraient d'être approfondis. Le concept de niveau de confiance demanderait d'être appliqué sur des bassins versants voire des régions afin de tester sa pertinence. Il serait également intéressant de poursuivre le travail initié sur les incertitudes et les imprécisions, avec une diversité de sites d'étude plus grande. La simplification des AZI ainsi que le modèle de développement de la cartographie hydrogéomorphologique pourraient faire l'objet d'échanges avec des services de l'État, afin d'identifier l'applicabilité des changements avancés. Quant à la cartographie positive, ses débouchés résident dans la planification urbaine et concernent davantage les collectivités locales.

Nous évoquons à maintes reprises le rôle prépondérant des crues historiques pour légitimer une cartographie hydrogéomorphologique. Il est possible d'élargir cet impact à la gestion des risques d'inondation qui se nourrit des événements marquants. Tel Sisyphe condamné chaque jour à remonter sa pierre, la gestion du risque inondation attend la crue suivante comme un élément fondateur. Collombat (2012) exprime ce fait en expliquant qu'en matière de gestion du risque, « gouverner c'est réagir [...] puis oublier ». Vouloir développer l'approche hydrogéomorphologique revient à s'affranchir de cette logique, pour faire des zones inondables une composante normale de certains territoires, indépendamment de tout événement catastrophique.

Références bibliographiques

- ALCÁNTARA-AYALA, I. (2002) - Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47, pp. 107–124.
- ALVAREZ, A. (2012) - *Utilisation et traitement des données MNT LiDAR pour la modélisation hydraulique et l'étude hydrogéomorphologique dans le cadre de la Directive Européenne 2007/60/CE relative aux risques d'inondation*. Mémoire de fin d'étude, ESGT, 49 p.
- ARNAUD-FASSETTA, G. (2007) - *L'hydrogéomorphologie fluviale, des hauts bassins montagnards aux plaines côtières : entre géographie des risques, géoarchéologie et géosciences*. Mémoire d'HDR, Université Paris VII, 3 vol., 35 p., 435 p. et 357 p.
- ARNAUD-FASSETTA, G., BALLAIS, J.-L., BEGUIN, E., JORDA, M., MEFFRE, J.C., PROVENSAL, M., RODITIS, J.C., SUANEZ, S. (1993) - La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992). Ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 62, 2, pp. 33–48.
- ASTRADE, L. (1998) - La Saône en crue : dynamique d'un hydrosystème anthropisé. *La Houille Blanche*, 1, pp. 13–17.
- AUTISSIER, D., MOUTOT, J.-M. (2007) - *Méthode de conduite du changement: diagnostic, accompagnement, pilotage*. Dunod, Paris, 256 p.
- BAAN, P.J.A., KLIJN, F. (2004) - Flood risk perception and implications for flood risk management in the Netherlands. *International Journal of River Basin Management*. 2, 2, pp. 113–122.
- BAKER, V.R. (1976) - Hydrogeomorphic methods for the regional evaluation of flood hazards. *Environmental Geology*. 1, 5, pp. 261–281.
- BAKER, V.R. (1994) - Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology*, 10, pp. 139–156.
- BALLAIS, J.-L. (2006) - Le Gardon d'Anduze et la méthode hydrogéomorphologique. *Études de Géographie Physique*, 23, pp. 5–12.
- BALLAIS, J.-L., CHAVE, S., DELORME-LAURENT, V., ESPOSITO, C. (2007) - Hydrogéomorphologie et inondabilité. *Géographie physique et Quaternaire*, 61, pp. 75–84.
- BALLAIS, J.-L., CHAVE, S., DUPONT, N., MASSON, É., PENVEN, M.-J. (2011) - *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Physio-Géo, 168 p.
- BALLAIS, J.-L., GARRY, G., MASSON, M. (2005) - Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi méditerranéen français. *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 13, pp. 1120–1130.
- BCEOM (2004) - *Méthode intégrée. Application de la méthode intégrée à l'Ouvèze : secteur de Vaison-la-Romaine à Violès*. Rapport CETE Méditerranée, Aix-en-Provence, 111 p.
- BECK, U. (2001) - *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Paris-Flammarion, Coll. Champs, 521 p. (édition originale : Risikogesellschaft Suhrkamp Verlag Franckfurt am Main 1986)
- BERTIN, J. (2005) - *Sémiologie graphique: Les diagrammes - Les réseaux - Les cartes*. Editions de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, 452 p.
- BETHEMONT, J. (2007) - 1856 : De la gestion d'une catastrophe au bon usage d'une crise. *La Houille Blanche*, 1, pp. 22–32.
- BEUCHER, S., RODE, S. (2009) - L'aménagement des territoires face au risque d'inondation: regards croisés sur la Loire moyenne et le Val-de-Marne. *Mappemonde*, 94, pp. 1–19.
- BIRON, P., BUFFIN-BELANGER, T., LAROCQUE, M., DEMERS, S., OLSEN, T., OUELLET, M.-A., CHONE, G., CLOUTIER, C.-A., NEEDELMAN, M. (2013) - *Espace de liberté: un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changement climatique*. Rapport OURANOS, 140 p.

- BLAMEY, R.K. (2001) - Principles of Ecotourism. In: Weaver, D (Dir.) : *The Encyclopedia of Ecotourism*. CABI, New York, pp. 5–22.
- BLANC, M., DEBACQ, L., MASTELLI, G. (2002) - *Prise en compte des risques d'inondation dans le schéma de cohérence territoriale de la région de Strasbourg*. Rapport pour l'Agence de Développement et d'Urbanisme de l'Agglomération Strasbourgeoise, 90 p.
- BOURDIEU, P. (1989) - *La Noblesse d'État : grandes écoles et esprit de corps*. Éd. de minuit, Paris, 568 p.
- BOURDIEU, P., PASSERON, J.-C. (1970) - *La reproduction éléments pour une théorie du système d'enseignement*. Éd. de Minuit, Paris, 279 p.
- BRAVARD, J.-P. (1994) - L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Revue de Géographie de Lyon*, 69, 5–10.
- BRAVARD, J.-P., PETIT, F. (1997) - *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*. Armand Colin, Paris, 222 p.
- BRAVARD, J.P., PROVANSAL, M., ARNAUD-FASSETTA, G., CHABBERT, S., GAYDOU, P., DUFOUR, S., RICHARD, F., VALLETEAU, S., MELUN, G., PASSY, P. (2008) - Un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône de la frontière suisse à la mer. Actes du colloque *GDR JURALP*, Aix-en-Provence, 15 et 16 décembre 2007, pp. 99-111.
- BREMOND, P. (2011) - *Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 1, 394 p.
- BRESSAN, F., GOLOSSOF, G., (1996) - *Méthode de calcul des débits rares et exceptionnels d'eaux pluviales et des lignes d'eau correspondantes sur les petits bassins versants naturels situés sur l'arc méditerranéen français*. Rapport technique, DDE du Gard, 42 p.
- BROUSSE, G., ARNAUD-FASSETTA, G., CORDIER, S. (2011) - Evolution hydrogéomorphologique de la bande active de l'Ubaye (Alpes françaises du Sud) de 1956 à 2004: contribution à la gestion des crues. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 3, pp. 307–318.
- CAILLEUX, A., TRICART, J., VIERS, G. (1968) - Introduction à la géomorphologie climatique. *Annales de Géographie*, 77, pp. 86–91.
- CAMARASA-BELMONTE, A.M., SORIANO-GARCIA, J. (2012) - Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). *Landscape and Urban Planning*, 104, 2, pp. 189–200.
- CANTON DU VALAIS (2008) - *Troisième correction du Rhône. Rapport de synthèse du plan d'aménagement*. 160 p.
- CAREX (2004) - *Application de la méthode intégrée à un tronçon de l'Ouvèze*. Rapport de synthèse au CÉTÉ Méditerranée, Aix-en-Provence, 70 p.
- CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUEBEC (2004) - *Programme de détermination des cotes de crues de récurrences de 20 ans et de 100 ans. Rivière Matane*. Québec, 41 p.
- CETE MEDITERRANEE (1981) - *Cartographie des zones inondables sur des tronçons du Buech, des Moyens Gardons Réunis et de l'Hérault*. Rapport de recherche, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme.
- CETE MEDITERRANEE (1986) - *Cartographie au 1/10000° des zones inondables du Gardon d'Anduze, sur le territoire de 11 Communes (Département du Gard)*. Documents intégrés dans les PER (Plans d'Exposition aux Risques) du Gardon d'Anduze. Rapport DDE du Gard.
- CETE MEDITERRANEE (1988) - *Cartographie au 1/10000° des zones inondables du Lez à l'amont de Montpellier*. Rapport DDE de l'Hérault.

- CETE MEDITERRANEE (2012) - *Adaptation des territoires aux crues majeurs. Commune de Durban-Corbières*. 11 p.
- CHAMOIX, C. (2003) - *Techniques alternatives en assainissement pluvial : de la théorie à la pratique*. Thèse de doctorat, Université Nice Sophia-Antipolis, 500 p.
- CHARLTON, M.E., LARGE, A.R.G., FULLER, I.C. (2003) - Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28, 3, pp. 299–306.
- CARON, A., MARTEL, R.P., NADEAU, J. (2009) - *La municipalité régionale de comté. Compétences et responsabilités*. Guide explicatif, Ministère des affaires municipales, des Régions et de l'occupation du territoire, 79 p.
- CHAVE, S. (2002) - Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemples de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 8, pp. 297–306.
- CHAVE, S. (2003) - *Élaboration d'une méthode intégrée de diagnostic du risque hydrologique*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I, 284 p.
- CHAVE, S., BALLAIS, J.-L. (2006) - From hydrogeomorphology to hydraulics computations : a multidisciplinary approach of the flood hazard diagnosis in the Mediterranean zone. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50, pp. 523–540.
- CHEMITTE, J. (2008) - *Adoption des technologies de l'information géographique et gestion des connaissances dans les organisations. Application à l'industrie de l'assurance pour la gestion des risques naturels*. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, 267 p.
- CHOUARI, W. (2009) - *Environnement et risques naturels dans le Grand Tunis : approche cartographique*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 407 p.
- CHOW, T.E., HODGSON, M.E. (2009) - Effects of lidar post-spacing and DEM resolution to mean slope estimation. *International Journal of Geographical Information Science*. 23, 10, 1277–1295.
- CŒUR, D., LANG, M., PAQUIER, A. (2002) - L'historien, l'hydraulicien et l'hydrologue et la connaissance des inondations. *La Houille Blanche*, 4, pp. 61–66.
- COLLOMBAT, P.-Y. (2012) - *Se donner les moyens de ses ambitions : les leçons des inondations du Var et du sud-est de la France*. Rapport d'information N° 775, Sénat, 388 p.
- COQUE, R. (2002) - *Géomorphologie*. Armand Colin, Collection U, 503 p.
- DAVID, S. (2013) - Estimation des débits de crue exceptionnels par l'approche hydrogéomorphologique sur le bassin versant de l'Arc dans les Bouches-du-Rhône. *Congrès SHF : Evènements extrêmes d'inondation 2013*, Lyon, 13 - 14 novembre 2013, 8 p.
- DAVIS, W.M. (1899) - The geographical cycle. *The Geographical Journal*, 14, pp. 481–504.
- DEGARDIN, F. (2002) - Urbanisation et inondations : de l'opposition à la réconciliation. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 1, pp. 91–103.
- DELGADO, J.-L. (2006). Estimation des crues de référence par approche géomorphologique. *La Houille Blanche*, 5, pp. 97–101.
- DELORME-LAURENT, V. (2007) - *Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I, 436 p.
- DEMANGEOT, J. (2002) - *Les milieux "naturels" du globe*. Armand Colin, Paris, 364 p.
- DEMERS, S., OLSEN, T., BUFFIN-BELANGER, T., MARCHAND, J.-P., BIRON, P.M., MORNEAU, F. (2014) - L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo*, 8, pp. 67–88.

- DEMERS, S., OLSEN, T., DUBE, J., BUFFIN-BELANGER, T., MORNEAU, F. (2012) - *La cartographie des zones inondables par une approche hydrogéomorphologique. Volume 2: Guide méthodologique*. Rapport Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 35 p.
- DERRUAU, M. (1974) - *Les formes du relief terrestre. Notions de géomorphologie*. Armand Colin, Paris, 120 p.
- DEWOLF, Y. (1981). De la carte géomorphologique aux enquêtes géotechniques. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*. 18, 1, pp. 9–12.
- DI BIASE, D. (1990) - Visualization in the Earth Sciences. *Earth and Mineral Sciences*, 59, 2, pp. 13–18.
- DIONNE, J.C. (1988) - Holocene relative sea-level fluctuations in the St. Lawrence estuary, Québec, Canada. *Quaternary Research*, 29, 3, pp. 233–244.
- DIREN DE BASSE-NORMANDIE (1996) - *Atlas des zones inondables du Calvados, de l'Orne et de la Manche*. 21 p.
- DIREN DE BASSE-NORMANDIE (2006) - *L'Atlas des Zones Inondables de Basse-Normandie*, plaquette de présentation, 6 p.
- DIREN LANGUEDOC-ROUSSILLON (2003) - *Atlas des zones inondables du bassin versant des Gardons*. Rapport d'étude, 93 p.
- DIREN LORRAINE (2008) - *Etude de Préfiguration du PAPI Meurthe. Phase 1 - Analyse bibliographique et synthèse des entretiens*. 221 p.
- DIREN PACA (2004) - *Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables en région PACA. Département du Var*. Rapport technique, 47 p.
- DIREN PACA (2007) - *L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables*. Guide méthodologique, 66 p.
- DIREN RHONE-ALPES (2006) - *Les plans de prévention des risques d'inondation du fleuve Rhône et de ses affluents à crue lente. Doctrine commune*. Guide méthodologique, 100 p.
- DOUVINET, J. (2008) - *Les bassins versants sensibles aux "crues rapides" dans le Bassin Parisien - Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes*. Thèse de doctorat, Université de Caen – Basse-Normandie, 381 p.
- DOUVINET, J., VINET, F. (2012) - La carte des arrêtés "CatNat" pour les inondations : limites et améliorations possibles. *Mappemonde*, 107, pp. 17–30.
- DREAL LANGUEDOC-ROUSSILLON (2010). *Atlas des Zones Inondables. Système d'Information Géographique. Notice*. Rapport méthodologique, 44 p.
- DUMOLARD, P. (2011) - *Données géographiques : Analyse statistique multivariée*. Editions Lavoisier, Publications Hermès Sciences, 208 p.
- DUPONT, N., PENVEN, M.-J., GABOREAU, W., GAILLARD, S. (2005) - *Définition des indicateurs pour une cartographie de la courbe enveloppe des inondations dans le cadre de l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique*. Rapport DIREN Bretagne, 52 p.
- EGIS EAU (2010a) - *Cartographie des zones inondable par analyse hydrogéomorphologique. Atlas des zones inondables sur le bassin versant de l'Aude*. Rapport DREAL Languedoc-Roussillon, 129 p.
- EGIS EAU (2010b). *Cartographie des zones inondables par analyse hydrogéomorphologique. Atlas des Zone Inondables sur les bassins versants du Lez et de la Mosson*. Rapport DREAL Languedoc-Roussillon, 54 p.
- EHLSCHLAEGER, C.R., SHORTRIDGE, A.M., GOODCHILD, M.F. (1997) - Visualizing spatial data uncertainty using animation. *Computers & Geosciences*. 23, 4, pp. 387–395.

- ESPOSITO, C. (2003) - *Crues de septembre 2002 sur le Bassin Versant du Gardon : étude comparative entre les limites de la cartographie hydrogéomorphologique et le relevé de la zone inondée*. Mémoire de DEA, Université Aix-Marseille I, 40 p.
- FERNÁNDEZ-LAVADO, C., FURDADA, G., MARQUÉS, M.A. (2007) - Geomorphological method in the elaboration of hazard maps for flash-floods in the municipality of Jucuarán (El Salvador). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 4, pp. 455–465.
- FOUCAULT, A., RAOULT, J.-F. (2003) - *Dictionnaire de géologie*. Dunod, Paris, 6^e édition, 382 p.
- GARRY, G. (1985) - *Photo-interpretation et cartographie des zones inondable*. Ministère de L'Environnement, Ministère de l'Équipement, Editions du STU, Paris, 74 p.
- GARRY, G. (1994) - Evolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France. *Mappemonde*, 4, pp. 10–16.
- GARRY, G., GRASZK, E. (1999) - *Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) : Risques d'inondation, Guide méthodologique*. Ministère de l'Équipement, Documentation Française, Paris, 123 p.
- GARRY, G., BALLAIS, J.-L., MASSON, M. (2002) - La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 8, 1, pp. 5–15.
- GAUTIER, E. (1994). Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine - L'exemple du Buëch (Alpes du sud). *Revue de Géographie de Lyon*, 69, pp. 57–62.
- GENDREAU, N., GRELOT, F., GARCON, R., DUBAND, D. (2003) - Risque d'inondation : une notion probabiliste complexe pour le citoyen. *Sciences, Eaux et Territoires*, 34, pp. 17–24.
- GENIVAR (2005) - *Bassin versant de la rivière Matane. Etude d'évaluation de la sécurité*. Rapport Technique, Centre d'Expertise Hydrique du Québec.
- GERIN, S. (2011). *Une démarche évaluative des Plans de Prévention des Risques dans le contexte de l'assurance des catastrophes naturelles : Contribution au changement de l'action publique de prévention*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 296 p.
- GILARD, O. (1998) - *Les bases techniques de la méthode inondabilité*. Guide Technique, CEMAGREF, 208 p.
- GOUVERNEMENT DU QUEBEC (2005) - Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Texte de loi. ([disponible en ligne](#))
- GRECO, S.E., GIRVETZ, E.H., LARSEN, E.W., MANN, J.P., TUIL, J.L., LONEY, C. (2008) - Relative elevation topographic surface modelling of a large alluvial river floodplain and applications for the study and management of Riparian landscapes. *Landscape Research*, 33, 4, pp. 461–486.
- GUERMOND, Y. (1988) - Mappemonde dans l'ère post-moderne. *Mappemonde*, 88, 3, pp. 42.
- GUERO, P., BERTHIER, E., RIK, P., WILLMES, M., LIENARD, S., MATHIEU, L. (2008) - Cartes d'aléa des PPRI : croisement des 3 méthodes Historique, Hydrogéomorphologique et Hydraulique. Présentation orale aux *plénières 2008 du LPCP, Journées Eau et Environnement, Lille, 27 et 28 novembre 2008*.
- GUERO, P., WILLMES, M. (2009) - Elaboration d'une carte d'aléas inondation sur la base d'une étude hydrogéomorphologique : cas du Petit-Morin. Présentation orale aux *plénières 2008 du LPCP, Journées Eau et Environnement, Bordeaux, 25 au 27 novembre 2008*.
- HARPOLD, A.A., BURNS, D.A., WALTER, M.T., STEENHUIS, T.S. (2013). Hydrogeomorphology explains acidification-driven variation in aquatic biological communities in the Neversink Basin, USA. *Ecological Applications*, 23, 4, pp. 791–800.

- HEWITT, K. (1983) - *Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology*. Allen & Unwin, Londres, 324 p.
- HODGSON, M.E., JENSEN, J., RABER, G., TULLS, J., DAVIS, B.A., THOMPSON, G., SCHUCKMAN, K. (2005) - An evaluation of lidar-derived elevation and terrain slope in leaf-off conditions. *Photogramm. Photogrammetric engineering and remote sensing*, 71, 7, pp. 817–823.
- HÖFLE, B., RUTZINGER, M. (2011) - Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. Issues* 55, 2, pp. 1–29.
- HORTON, R.E. (1945) - Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 3, pp. 275–370.
- HOWSON, T.J., ROBSON, B.J., MATTHEWS, T.G., MITCHELL, B.D. (2012) - Size and quantity of woody debris affects fish assemblages in a sediment-disturbed lowland river. *Ecological Engineering*, 40, pp. 144–152.
- HUTCHINSON, M.F., DOWLING, T.I. (1991) - A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes*, 5, 1, pp. 45–58.
- HUTCHINSON, M.F., XU, T., STEIN, J.A. (2011) - Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. Actes du colloque *Geomorphometry 2011*, Los Angeles, 7 septembre 2011. pp. 19–22.
- IOANA-TOROIMAC, G. (2009) - *La dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Prahova (Roumanie): fonctionnement actuel, évolution récente et conséquences géographiques*. Thèse de Doctorat, Université Lille I, 341 p.
- JBA CONSULTING (2012) - *Modélisation simplifiée des bassins versants de l'Oise, du Gardon et du Vistre*. Rapport technique, MEDDTL.
- JODELET, D. (1989) - *Les représentations sociales*. Presses universitaires de France, Paris, 310 p.
- JOLY, F. (1962) - Principes pour une méthode de cartographie géomorphologique. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 39, pp. 270–278.
- JOLY, F. (1965) - La représentation du Quaternaire sur les cartes morphologiques. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 2, pp. 9–14.
- KUHN, T.S. (1996) - *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, 3e édition, 226 p.
- LAGANIER, R., SCARWELL, H.-J. (2003) - Risques hydrologiques et territoires. In : Moriniaux V., (Dir.) *Les Risques*. Editions du Temps, Nantes, pp. 106–116.
- LAMBERT, C., GAZELLE, M., GHOLAMI, M. (2000) - La cartographie informative des zones inondables. L'exemple de Midi-Pyrénées. Actes du colloque *Au chevet d'une catastrophe*, Presses Universitaires de Perpignan, Perpignan, pp. 147–164.
- LANDON, N., PIÉGAY, H., BRAVARD, J.P. (1998) - The Drôme river incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43, pp. 119–131.
- LANG, M., COEUR, D., BARD, A., BACQ, B., BECKER, T., BIGNON, E., BLANCHARD, R., BRUCKMANN, L., DELSERIEYS, M., EDELBLUTTE, C., MERLE, C. (2013) - Les inondations remarquables en France : premiers éléments issus de l'enquête EPRI 2011. *La Houille Blanche*, 5, 37–47.
- LASTRA, J., FERNÁNDEZ, E., DÍEZ-HERRERO, A., MARQUÍNEZ, J. (2008) - Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, 45, 2, 277–293.
- LATAPIE, A., TERRIER, B., PAQUIER, A., LANG, M., CHAMBON, D., DOUMENC, H., DELGADO, J.-L. (2013) - Comparaison des cartographies des zones inondables par approche hydrogéomorphologique et des zones inondées définies par modélisation hydraulique sur la

- Garonne et les Gardons. *Congrès SHF : Evènements extrêmes d'inondation, Lyon, 13 - 14 novembre 2013*, 7 p.
- LAVABRE, J., FOUCHIER, C., FOLTON, N., GREGORIS, Y. (2003) - SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises. *Sciences, Eaux et Territoires*, spécial risques naturels et aménagement du territoire, pp. 97–111.
- LAVÉ, J., AVOUAC, J.P. (2001) - Fluvial incision and tectonic uplift across the Himalayas of central Nepal. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106, pp. 26561–26591.
- LE BOURHIS, J.-P. (2007) - Du savoir cartographique au pouvoir bureaucratique. Les cartes des zones inondables dans la politique des risques (1970-2000). *Genèses*, 68, pp. 75–96.
- LE BOURHIS, J.-P., BAYET, C. (2002) - *Ecrire le risque. Cartographie du danger et transformations de l'action publique dans la prévention des inondations. Volume II. Rapport de Synthèse.* Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 177 p.
- LE LAY, Y.-F. (2008) - Le Mississippi d'Élisée Reclus : donner du sens aux eaux courantes. *Cahiers de Géographie du Québec*. 52, 46, pp. 215-228.
- LEFORT, P., KOULINSKI, V. (2011) – *Crue du 15-16 juin 2010. Expertise post-crue. Analyse hydrologique de la crue de juin.* Rapport remis au Conseil Général du Var et au Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Nartuby, 33 p.
- LELIEVRE, M.-A., BUFFIN-BELANGER, T., MORNEAU, F. (2008) - L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans les vallées de petites et moyennes tailles : un exemple commenté pour la vallée de la Rivière-au-Renard. In : *Comptes rendus de la 4ème Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion*, Presse de l'Université Laval, Québec, 8 p.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. (1957) - River channel patterns: braided, meandering, and straight. *US Geological Survey Professional Paper*, 282B, pp. 39-85.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., MILLER, J.P. (1964) - *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. FREEMAN, San Francisco, 522 p.
- LEQUIN, M. (2001) - *Écotourisme et Gouvernance Participative*. Presse de l'Université du Québec, Québec, 254 p.
- LUINO, F. (1998) - Study on some villages damaged by natural processes in NW Italy. *Proceedings Eight International Congress International Association for Engineering Geology and Environment*, Vancouver. pp. 1065-1070.
- MAC EACHREN, A.M. (1992) - Visualizing Uncertain Information. *Cartographic Perspectives*, 13, pp. 10–19.
- MAC EACHREN, A.M. (1994) - *Some Truth with Maps: A Primer on Symbolization and Design*. Association of American Geographers, Washington, 129 p.
- MAC EACHREN, A.M. (1995) - *How Maps Work: Representation, Visualization, and Design*. Guilford Publications, New York, 484 p.
- MAC EACHREN, A.M., ROBINSON, A., HOPPER, S., GARDNER, S., MURRAY, R., GAHEGAN, M., HETZLER, E. (2005) - Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know. *Cartography and Geographic Information Science*, 32, 3, pp. 139–160.
- MAINGUET, M. (2003) - Hommage à Jean Tricart (1920 - 2003). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 9, pp. 191–195.
- MALLET, C., BRETAR, F. (2007) - Le lidar topographique à retour d'onde complète : état de l'art. *Traitement du signal*, 24, 6, 385–409.

- MARCHAND, J.-P., BUFFIN-BÉLANGER, T., HÉTU, B., ST-ONGE, G. (2013a) - Holocene stratigraphy and implication for fjord valley-fill models of the Lower Matane River valley, Eastern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51, 2, pp. 105-124.
- MARCHAND, J.-P., DIDIER, D., BUFFIN-BELANGER, T., BERNATCHEZ, P. (2013b) - *Cartographie des zones inondables et des zones de submersion à l'aide d'une méthode hydrogéomorphologique pour le secteur de la rivière Bonaventure*. Rapport technique, Ministère de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 60 p.
- MARKS, K., BATES, P. (2000) - Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes*, 14, pp. 2109–2122.
- MARTIN, C. (2010) - Les inondations du 15 juin 2010 dans le Centre Var : réflexion sur un épisode exceptionnel. *Physio-Géo*, 4, pp. 5–43.
- MASCAREÑAS I RUBIES, P. (2012) - Característiques i inundabilitat per rierades sobtades (flash flood) als torrents costaners del nord del cap de Creus (Catalunya). Thèse de doctorat, Universitat de Barcelona, 350 p.
- MASSON, M. (1983) - Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation. Rapport technique, CETE Méditerranée, 47 p.
- MASSON, M. (1993) - Après Vaison-la-Romaine : pour une approche pluridisciplinaire de la prévision et de la planification. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 2, pp. 73-77.
- MASSON, M., COSPEN, M., FAURE-VASSAL, G. (2003) - *Méthode systémique au service d'un aménagement durable du territoire*. Rapport de synthèse, CÉTÉ Méditerranée, 102 p.
- MASSON, M., GARRY, G., BALLAIS, J.-L. (1996) - *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*. Guide méthodologique, Editions villes et territoires, Paris, 100 p.
- MEDD (2001) - *Termes de référence d'un CCTP des Atlas des Zones Inondables*. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, 104 p.
- MEDD (2006) - *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR). Cahier de recommandations sur le contenu des PPR*. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 40 p.
- MESSNER, F., MEYER, V. (2006) – Flood damage, vulnerability and perception – challenges for flood damage reseach. In: Schanze, J., Zeman, E., Marsalek, J. (Dir.) : *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, NATO Science Series. Springer, pp. 149–167.
- METLTM, MEDD (2004) - *Circulaire du 21/01/04 relative à la maîtrise de l'urbanisme et adaptation des constructions en zone inondable*. BOMEDD n°15 du 15 août 2004.
- METT, (1994) - *Circulaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondable*. Journal Officiel de la République Française n°84 du 10 avril 1994 page 5330.
- MONGE, O., STRATEGIS, BRUNO LEDOUX CONSULTANTS (2003) - *Analyse du contenu des plans de prévention des risques naturels (PPR) e réalisation d'un cahier de recommandations. Phase 1 : évaluation globale de la qualité des 3600 PPR ayant été approuvés sur le territoire national français*. Rapport, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 48 p.
- MONTANE, A., BUFFIN-BELANGER, T., VENTO, O., COME, J.-M. (2014) - *Réalisation d'un modèle numérique de zones inondables sur la rivière Matane et propositions d'utilisation réglementaire*. Rapport méthodologique, Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 31 p.
- MONTANE, A., VENTO, O., VINET, F., COME, J.-M. (2012) - *Utilisation de la donnée LiDAR pour la cartographie hydrogéomorphologique et la réalisation de MNZI*. Rapport méthodologique, MEDDE, Direction Générale de la Prévention des Risques, 47 p.

- NANSON, G.C., CROKE, J.C. (1992) - A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4, pp. 459–486.
- NICOD, J. (1949). La crue de la Meurthe et de la Moselle, 28-31 décembre 1947. *L'information géographique*, 13, 1, pp. 12-16.
- NICOD, J. (2011) - Les Gorges de Trévans dans le front subalpin – Un site exceptionnel des Alpes de Haute-Provence. *Physio-Géo*, 5, pp. 227–249.
- NOTEBAERT, B., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G., POESEN, J. (2009) - Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, pp. 217–231.
- OCCHIETTI, S., RICHARD, P.J.H. (2003) - Effet réservoir sur les âges C14 de la Mer de Champlain à la transition Pléistocène-Holocène : révision de la chronologie de la déglaciation au Québec méridional. *Géographie physique et Quaternaire*, 57, 2-3, pp. 115–138.
- OLSEN, T., DEMERS, S., DUBE, J., BUFFIN-BELANGER, T., MORNEAU, F. (2011) - *Cartographie des risques fluviaux dans la vallée de la rivière Matane par l'approche hydrogéomorphologique. Volume 1 : Guide d'interprétation*. Rapport, Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 21 p.
- ORGANDE, D., ARNAUD, P., FINE, J.-A., FOUCHIER, C., FOLTON, N., LAVABRE, J. (2013) - Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG. *Revue des sciences de l'eau*, 26, pp. 65–78.
- PALKA, G. (2010) - *Sémiologie graphique expérimentale. Pour une cartographie du risque d'inondation plus adaptée aux besoins et attentes des destinataires*. Projet de fin d'étude, Ecole polytechnique de Tours, 71 p.
- PARENT, M., OCCHIETTI, S. (1988). Late Wisconsinan Deglaciation and Champlain Sea Invasion in the St. Lawrence Valley, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 42, 3, pp. 215–246.
- PEIRY, J.L., BRAVARD, J.P. (1989) - Evolution naturelle d'un remplissage sédimentaire intramontagnard et impacts des aménagements contemporains : L'exemple de la vallée de l'Arve (74). *La Houille Blanche*, 3-4, pp. 221–225.
- PENVEN, M.J., DUPONT, N., MARGUERIE, D. (2008) - Mosaïque spatiale des fonds alluviaux et fonctionnement hydrogéomorphologique du lit majeur lors des inondations. In : CRAVE, A. (Dir.) : *Inondations dans le bassin de la Vilaine : paramètres hydrogéomorphologiques et flux terrigènes*. Rapport scientifique IAV, pp. 93-179.
- PIEGAY, H., PAUTOU, G., RUFFINONI, C. (2003) - *Les forêts riveraines des cours d'eau*. Institut pour le développement forestier, 464 p.
- PIGEON, P. (2007) - Les Plans de Prévention des Risques (PPR) : essai d'interprétation géographique. *Géocarrefour*, 82, pp. 27–34.
- PLATE E.J. (2002) - Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267, pp. 2–11.
- POOLE, G.C. (2010) - Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, pp. 29, 12–25.
- PREFECTURE DE LA REGION MIDI-PYRENEES (2008) - *Document de référence des services de l'État en région Midi-Pyrénées pour l'évaluation du risque inondation et l'élaboration des PPRI*, 32 p.
- RECLUS, E. (1859). Le Mississipi, Études et Souvenirs. *Revue des Deux Mondes*, 22, pp. 608–646.
- REYNARD, E., PANIZZA, M. (2005) - Géomorphosites : définition, évaluation et cartographie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, pp. 177-180.
- ROBINSON, A.H. (1976) - *The nature of maps: essays toward understanding maps and mapping*. University of Chicago Press, Chicago, 138 p.

- ROCHER, G. (2005) - *Introduction à la sociologie générale*. Hurtubise HMH, Montréal, 3^e édition, 685 p.
- ROGERS, E.M. (2010) - *Diffusion of Innovations*, Simon and Schuster, New York, 4e edition, 518 p.
- ROUX, H. (2004) - *Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne*. Thèse de doctorat, INP Toulouse, 274 p.
- RUFFINONI, C. (1996) - Contribution des ripisylve au contrôle des flux d'azote en milieu fluvial. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 29, pp. 115–137.
- SANDERS, B.F. (2007) - Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in water resources*, 30, 8, pp. 1831–1843.
- SANDERS, L. (1990) - *L'analyse statistique des données en géographie*. Reclus, Paris, 267 p.
- SANDINK, D., KOVACS, P., OULAHEN, G., MCGILLIVRAY, G. (2010) - *Rendre les inondations assurables pour les propriétaires canadiens : document de travail*. Institut de prévention des sinistres catastrophiques et la Compagnie Suisse de Réassurances SA, 82 p.
- SCARWELL, H.-J., LAGANIER, R. (2004) - *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 240 p.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1973) - Hydrogeomorphology. *Journal of Hydrology*, 20, 3, pp. 193–215.
- SCHUMM, S.A. (1977) - *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, New-York, 338 p.
- SIDLE, R.C., ONDA, Y. (2004) - Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological Processes*, 18, 4, pp. 597–602.
- SLUTER, R. (2001) - New theoretical research trends in cartography. *Revista Brasileira de Cartografia*, 53, pp. 29–37.
- SORENTE, I. (2011) - *Addiction générale*. JC Lattès, Paris, 200 p.
- STOUT, J.C., BELMONT, P. (2013) - TerEx Toolbox for semi-automated selection of fluvial terrace and floodplain features from LiDAR. *Earth Surface Processes and Landform*, 39, 5, pp. 659-580.
- TARDIF, J. (2003) - Écotourisme et développement durable. *Vertigo*, 4, 1, pp. 1–11.
- TARLOCK, A.D. (2012) - United States Flood Control Policy: The Incomplete Transition from the Illusion of Total Protection to Risk Management. *Duke Environmental Law & Policy Forum*, 23, pp. 151–183.
- THORP, J.H., FLOTEMERSCH, J.E., DELONG, M.D., CASPER, A.F., THOMS, M.C., BALLANTYNE, F., WILLIAMS, B.S., O'NEILL, B.J., HAASE, C.S. (2010) - Linking Ecosystem Services, Rehabilitation, and River Hydrogeomorphology. *BioScience*, 60, pp. 67–74.
- TRICART, J. (1956) - Un nouvel instrument au service de l'agronomie : les cartes géomorphologiques. *Sols Africains*. IV, pp. 66–102.
- TRICART, J. (1958) - La crue de la mi-juin 1957 sur le Guil, l'Ubaye et la Cerveyrette. *Revue de géographie alpine*, 5, 565–627.
- TRICART, J. (1960) - Les types de lits fluviaux. *L'information géographique*, 24, pp. 210–214.
- TRICART, J. (1965) - Principes de réalisation des cartes géomorphologiques détaillées. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 2, pp. 15–16.
- TRICART, J. (1973) - La géomorphologie dans les études intégrées d'aménagement du milieu naturel. *Annales de Géographie*, 82, pp. 420–453.
- VERLEY, P. (1997) - *La Révolution industrielle*. Folio, Paris, 544 p.
- VEYRET, Y., REGHEZZA-ZITT, M. (2005) - Aléas et risques dans l'analyse géographique. *Annales des Mines*, 40, pp. 61–89.

- VEYRET, Y., REGHEZZA-ZITT, M. (2006) - Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité. *Annales des mines*, 43, pp. 9-13.
- VINET, F. (2010) - *Le risque inondation : Diagnostic et gestion*. Editions Lavoisier collection SRD, 328 p.
- WHITE, G.F. (1945) - *Human adjustments to floods: a geographical approach to the flood problem in the United States*. Research Paper, N°29, Department of Geography, University of Chicago.
- WIEDERKEHR, E., DUFOUR, S., PIEGAY, H. (2009) - *Caractérisation du corridor naturel alluvial du réseau hydrographique du bassin du Rhône à partir des orthophotographies de l'IGN. Premiers retours d'expérience pour l'élaboration de modèles hydrogéomorphologiques prédictifs*. Agence de l'eau RMC-ZABR-CEREGE, rapport non publié, 65 p.
- WILSON, J.P. (2012) - Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137, pp. 107–121.
- WOLMAN, M.G. (1971) - Evaluating Alternative Techniques Floodplain Mapping. *Water Resources Research*, 7, 6, pp. 1383–1392.
- WULAMU, M. (2010) - *Les risques d'inondation dans la région du Xinjiang (Chine) : cas du Karakash-Darya*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I, 345 p.
- WULAMU, M., BALLAIS, J.-L., DELORME, V. (2013) - L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au domaine aride du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash. *Physio-Géo*, 7, pp. 285–306.

Liste des sigles et abréviations

ACM ou AFCM : Analyse (Factorielle) des Correspondances Multiples

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

AZI : Atlas des Zones Inondables

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CCR : Caisse Centrale de Réassurance

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulière

CEHQ : Centre d'Expertise Hydrique du Québec

CEMAGREF : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (IRSTEA depuis 2012)

CÉTÉ : Centre d'Études Techniques de l'Équipement

CIZI : Cartographie Informatrice des Zones Inondables

DDE : Direction Départementale de l'Équipement

DDEA : Directions Départementales de l'Équipement et de l'Agriculture

DDT(M) : Direction Départementale des Territoires (et de la Mer). Fusion des DDE et des DDEA qui prend en charge l'instruction des PPRI

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement (DREAL depuis 2009-2011)

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DRIEE : Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (remplace les DDT et les DREAL pour la région Île-de-France)

EPRI : Évaluation Préliminaire du Risque d'Inondation (1^{ère} phase de la « Directive Inondation »)

ERP : Établissement Recevant du Public

HGM : Hydrogéomorphologique

IGN : Institut Géographique National

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

MAMROT : Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du Territoire (Québec)

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (France)

MDDEFP : Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (Québec)

MEDD : Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (France)

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (France)

MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, des Transports et du Logement (France)

METL : Ministère de l'Équipement, des Territoires et du Logement (France)

METLTM : Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer (France)

METT : Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme

MNLE : Modèle Numérique de Ligne d'Eau

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MNZI : Modèle Numérique de Zones Inondables

MRC : Municipalité Régionale de Comté (Québec)

MSP : Ministère de la Sécurité Publique (Québec)

NGF : Nivellement Général de la France

PACA : Provence-Alpes-Côtes-d'Azur

PAPI : Programme d'Action et de Prévention des Inondations

PCS : Plan Communal de Sauvegarde

PER : Plan d'Exposition aux Risques

PGRI : Plan de Gestion des Risques d'Inondation (3^{ème} phase de la « Directive Inondation »)

PHEC : Plus Hautes Eaux Connues

PLU : Plan Local d'Urbanisme

PPR : Plan de Prévention des Risques

PPRI : Plan de Prévention des Risques d'Inondation

PPRLPI : Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables PSS

SCOT : Schéma de Cohérence Territoriale

SIG : Système d'Information Géographique

TN : Terrain Naturel

TRI : Territoire à Risque d'Inondation Important

ZED : Zone d'Écoulement dynamique

Liste des figures, photographies et tableaux

Liste des Figures

Figure 1 : Schématisation du plan de la thèse	15
Figure 2 : Schéma du Système fluvial (source Campy et Macaire, 1989).....	19
Figure 3 : Carte géomorphologique des Gorges de Trévan, dans les Alpes. (Nicod, 2011)	20
Figure 4 : Extrait du PSS de l'Yonne, approuvé par le décret du 13 janvier 1949 (source : DDT de l'Yonne)	22
Figure 5 : Cartographie géomorphologique des zones inondables du Gardon d'Anduze (Source : CETE Méditerranée, 1986)	25
Figure 6 : Section transversale de la rivière Pedernales (Texas) et correspondance entre des formations alluviales, végétales et des crues historiques (Source : Baker, 1976)	27
Figure 7 : Exemple de carte papier, avec annotations de terrain (source : BURGEAP).....	31
Figure 8 : Les unités hydrogéomorphologiques (d'après Masson <i>et al.</i> , 1996)	32
Figure 9 : Recouvrement de la limite externe du lit majeur par le colluvionnement (Masson <i>et al.</i> , 1996)	34
Figure 10 : Aperçu des AZI hydrogéomorphologiques sur la plateforme CARMEN de la DREAL Languedoc-Roussillon (http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr/19/dreal_lr_general.map).....	35
Figure 11 : Aperçu des AZI hydrogéomorphologiques pour le département du Var (http://cartorisque.prim.net/dpt/83/83_ip.html)	35
Figure 12 : Les AZI par approche hydrogéomorphologique en France	36
Figure 13 : Extraits de cartographies hydrogéomorphologiques en Languedoc-Roussillon (a), Midi-Pyrénées (b) et Basse-Normandie (c). (Source : DREAL Languedoc-Roussillon ; DREAL Midi-Pyrénées ; DREAL Basse-Normandie)	38
Figure 14 : Extraits de cartographies hydrogéomorphologiques dans la Vienne (a), la Saône-et-Loire(b) et Guadeloupe (c). (Source : DDE de la Vienne, DIREN de Bourgogne et DIREN de Guadeloupe)	39
Figure 15 : Cartographie paléo-environnementale du Rhône, zoom sur le secteur de Lyon. (Bravard <i>et al.</i> , 2008)	40
Figure 16 : DDT (a) et DREAL (b) ayant répondu aux questionnaires.....	47
Figure 17 : Représentation cartographique de questions relatives à l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI.....	51
Figure 18 : Représentation cartographique de questions relatives à la crue de faible probabilité de la « Directive Inondation »	52
Figure 19 : Représentation cartographique d'une question relative au développement futur de la cartographie hydrogéomorphologique	53
Figure 20 : Positionnement des profils en travers pour le PPRI du Fiumorbo et de l'Ambatesco (Source : BURGEAP, 2013 ; DREAL Corse).....	54
Figure 21 : Extrait de la cartographie de l'aléa du PPRI de la Cèze. (Source : DDTM du Gard, 2011)	55
Figure 22 : Extrait de la cartographie de l'aléa pour le PPRI de l'Ibie (source : BURGEAP, 2013).....	56
Figure 23 : Cartographie du PPRI de Castries (34) et de a zone inondable hydrogéomorphologique	58
Figure 24 : Méthodologie de collecte et de traitement des PPRI	60
Figure 25 : Les rapports de PPRI récoltés.....	62
Figure 26 : Cartographie de l'aléa inondation (a) du PPRI de l'Arre inférieure et de la Garonne à Toulouse	64
Figure 27 : Répartition chronologique des prescriptions et approbations des PPRI étudiés.....	65

Figure 28 : Distribution des communes des PPRI étudiés selon l'année d'approbation et selon la source d'information	67
Figure 29 : Distribution des communes des PPRI étudiés selon l'année de prescription et selon la source d'information	67
Figure 30 : Distribution spatiale des sources des rapports de présentation des PPRI étudiés	68
Figure 31 : Distribution spatiale du type de crue de référence des PPRI étudiés	69
Figure 32 : Les crues historiques des PPRI étudiés.....	70
Figure 33 : Chronologie des crues historiques de référence des PPRI étudiés	71
Figure 34 : Cartographie de la prise en compte de l'hydrogéomorphologie dans les PPRI analysés.....	73
Figure 35 : L'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI étudiés, par année de prescription	74
Figure 36 : Utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique pour les zones sans enjeux et les affluents	75
Figure 37 : Réalisation d'une carte d'aléa à partir d'une cartographie hydrogéomorphologique (Source : O. Vento, 2008).....	76
Figure 38 : Extrait de la cartographie de l'aléa inondation du Manoire. (Source : DDT de la Dordogne, 2012)...	77
Figure 39 : Vision schématique de l'utilisation de l'aléa résiduel dans les zones urbaines	79
Figure 40 : La cote de référence pour l'aléa résiduel dans les zones urbaines	80
Figure 41 : Exemple de zonage réglementaire avec l'aléa résiduel en zone urbaine. PPRI du Moyen Vidourle, commune de Monmirat (DDE du Gard)	80
Figure 42 : Le zonage réglementaire dans les départements du Gard (a) et de l'Hérault (b). (Source : DDTM du Gard et DDTM de l'Hérault).....	81
Figure 43 : La « cote HGM » dans les zones urbaines des PPRI	82
Figure 44 : Carte d'aléa du PPRI de Mesnil-Martinsart (Source : DDTM80).....	84
Figure 45 : Zonage réglementaire du PPRI de Mesnil-Martinsart (Source : DDTM80).....	85
Figure 46 : PPRI de l'Yerres. Hauteurs d'eau issues du MNZI hydrogéomorphologique (Source : Guéro et al, 2008)	86
Figure 47 : Les PPRI qui emploient la méthode du MNZI pour la cartographie de l'aléa inondation	87
Figure 48 : Prise en compte d'une crue millénaire « exceptionnelle » dans le PPRI du Grand Lyon (Source : Service Navigation Rhône Saône).....	89
Figure 49 : Coordonnées principales des variables sur les axes F1 et F2	92
Figure 50 : Coordonnées principales des individus sur les axes F1 et F2	93
Figure 51 : Représentation des variables liées à l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI	94
Figure 52 : Elaboration d'un MNZI	99
Figure 53 : Vue en travers d'un MNZI	100
Figure 54 : Principe du LiDAR aéroporté (Source : CETE Normandie-Centre).....	101
Figure 55 : La couverture LiDAR des cours d'eau français pour la « Directive Inondation » (source : DGPR)	102
Figure 56 : Les différentes visualisations du LiDAR	104
Figure 57 : Comparaison entre le LiDAR de 1 m et de 3 m de résolution à l'échelle 1/25000°	105
Figure 58 : Profil en long du secteur amont de la Meurthe	106
Figure 59 : Positionnement de profils en travers sur la Meurthe	107
Figure 60 : Exemple d'une section de contrôle de la rivière Matane	108
Figure 61 : Vue longitudinale schématique des sections de contrôle et des profils en travers du MNZI	109
Figure 62 : Conversion des profils polygones en points	110

Figure 63 : Le MNLE et les profils associés	110
Figure 64 : MNZI « brut » (Source LiDAR : MSP)	111
Figure 65 : MNZI raster avec une échelle de couleurs continue (Source LiDAR : MSP)	111
Figure 66 : MNZI discrétisé (Source LiDAR : MSP)	112
Figure 67 : MNZI raster et MNZI vectorisé	113
Figure 68 : Les 12 territoires à risque important d'inondation du bassin Rhin-Meuse (Source : DREAL Lorraine)	114
Figure 69 : Localisation des sites d'étude en France.....	115
Figure 70 : Localisation des sites d'étude au Québec	116
Figure 71 : Localisation du secteur du Gardon d'Alès	117
Figure 72 : Semis de points du LiDAR utilisé pour le Gardon d'Alès	118
Figure 73 : Localisation du secteur d'étude de l'Argens	119
Figure 74 : MNT LiDAR de l'Argens (Source : BD alti, IGN).....	119
Figure 75 : Localisation des secteurs d'étude de la Meurthe	121
Figure 76 : Localisation du secteur d'étude de la rivière Matane	122
Figure 77 : Localisation du secteur d'étude de la rivière Richelieu	124
Figure 78 : Comparaison entre l'AZI du Gardon et la cartographie hydrogéomorphologique réalisée à partir du LiDAR	125
Figure 79 : Comparaison entre la cartographie hydrogéomorphologique et le MNZI du Gardon.....	127
Figure 80 : Comparaison entre le MNZI et la crue millénale de JBA Consulting	128
Figure 81 : Comparaison entre l'AZI de l'Argens et la cartographie hydrogéomorphologique réalisée à partir du LiDAR	129
Figure 82 : Cartographie de l'aléa inondation du PPRI de l'Argens, dans le secteur de Vidauban	131
Figure 83 : MNZI de l'Argens, sur le secteur de Vidauban	131
Figure 84 : Localisation des profils en travers pour le secteur amont de la Meurthe	133
Figure 85 : Le PSS et le MNZI de la Meurthe	134
Figure 86 : Repérage des glacis d'épandage grâce à des profils topographiques.....	135
Figure 87 : Comparaison entre la crue de 1947 et le MNZI de la Meurthe aval (a) et zoom sur le secteur de Nancy (b)	137
Figure 88 : Localisation des profils en travers sur le secteur d'étude de la rivière Matane. (Source cartographie HGM : UQAR, 2011).....	138
Figure 89 : Vue en plan et en coupe du profil 31 sur la rivière Matane.....	139
Figure 90 : Comparaison entre le MNZI de la Matane, la crue vingtennale et centennale	141
Figure 91 : Profil en travers sur la rivière Richelieu	143
Figure 92 : Schéma des zones inondables de la rivière Richelieu	145
Figure 93 : Localisation des profils en travers et de la zone inondable pour le secteur d'étude de la rivière Richelieu	146
Figure 94 : Comparaison entre le MNZI de la Richelieu et la zone inondée le 07/05/2011	148
Figure 95 : Comparaison entre le MNZI de la Richelieu, la crue centennale et vingtennale	149
Figure 96 : La crue extrême et la crue moyenne du TRI de Nancy/Damelevières	153
Figure 97 : Extrait de la cartographie des risques d'inondation sur le TRI de Saint-Dié-des-Vosges-Baccarat ...	154
Figure 98 : Représentation de la pente pour l'Argens (a), le Gardon d'Alès (b), la Meurthe (c), la Matane (d) et la Richelieu (e).....	156
Figure 99 : Vue en coupe d'un lit en toit dans un secteur de basse plaine.....	163

Figure 100 : Cartographie et profil topographique d'une succession de terrasses alluviales de la rivière Matane	168
Figure 101 : Application des concepts d'imprécision et d'incertitude à la cartographie des zones inondables.....	170
Figure 102 : Différenciation du talus externe de la zone inondable en fonction du substrat.....	171
Figure 103 : Schématisation des paramètres influençant le niveau de confiance en une cartographie hydrogéomorphologique	173
Figure 104 : Cartographie théorique de caractéristiques d'un bassin versant et des niveaux de confiance de l'interprétation hydrogéomorphologique qui en résultent	175
Figure 105 : Extrait de l'AZI de l'Aude (Source DREAL Languedoc-Roussillon) visant à définir le degré de compréhension d'une cartographie hydrogéomorphologique	180
Figure 106 : Extrait de l'AZI Lez-Mosson (Source DREAL Languedoc-Roussillon) visant à définir le degré de compréhension des aléas au sein d'un lit majeur	181
Figure 107 : Pourcentage de réponses pour chaque point	182
Figure 108 : Pourcentage de réponse pour chaque point en fonction du niveau de connaissance en géomorphologie	183
Figure 109 : Les figurés des cônes torrentiels (a) et des remblais d'infrastructure (b).....	187
Figure 110 : Extrait de l'AZI Lez-Mosson, commune de Montarnaud.....	188
Figure 111: Extrait de l'AZI Lez-Mosson, commune de Saint-Clément-de-Rivière.....	189
Figure 112 : Représentation des incertitudes dans l'AZI Lez-Mosson, à Montpellier (Source : DREAL Languedoc-Roussillon)	191
Figure 113 : Représentation du colluvionnement et des « limites hautes » et « limites basses » liées à l'imprécision de la localisation de la zone inondable	192
Figure 114 : Cartographies schématiques de l'actuelle légende des AZI hydrogéomorphologiques (a) et de proposition de simplification de la légende (b).....	194
Figure 115 : La cartographie hydrogéomorphologique, une étape entre la réalité et l'AZI	196
Figure 116 : Carte d'aptitudes et de contraintes (Source : Masson <i>et al.</i> , 2003).....	198
Figure 117 : Méthodologie employée pour la réalisation de la cartographie positive	199
Figure 118 : Les unités hydrogéomorphologiques utilisées.....	200
Figure 119 : Contraintes et potentialités pour les habitations et les activités économiques	206
Figure 120 : Potentialités de mise en valeur écologique	207
Figure 121 : Cartographie de la synthèse des potentialités sur la rivière Matane.....	208
Figure 122 : Le développement institutionnel de la cartographie hydrogéomorphologique sur un territoire ..	213
Figure 123 : Cartographie des zones de grand courant et de faible courant par approche hydrogéomorphologique (modifié d'après Marchand <i>et al.</i> , 2013).....	224
Figure 124 : Zonage réglementaire à Saint-René-de-Matane	226

Liste des Photographies

Photographie 1 : Exemple de rupture de pente nette entre le lit majeur de l'Argens et les versants rocheux (Var)	29
Photographie 2 : Limite de zone inondable peu nette mais visible grâce à la différence de couleur des sols (Meurthe)	29
Photographie 3 : Glissières synonymes de l'utilisation d'un batardeau en cas de crue (Collioure, 66)	30
Photographie 4 : Repères de la crue de 1999 de la Berre, à Portel-des-Corbières.....	31
Photographie 5 : (a) Contact entre le versant et le lit majeur en amont de Castries ; (b) station d'épuration de Castries	58
Photographie 6 : Limite de zone inondable sur le secteur de la Meurthe amont. Commune de Flin	132
Photographie 7 : Limite de zone inondable peu nette entre un glaciais d'épandage et le lit majeur de la Meurthe	135
Photographie 8 : Le canal de Chambly en rive gauche de la rivière Richelieu	142
Photographie 9 : La rivière Richelieu en amont du secteur d'étude.....	142
Photographie 10: Route remblayée en zone inondable qui relie des habitations à la route principale.....	144
Photographie 11 : Distinction entre le lit majeur et l'encaissant pour la rivière Richelieu.....	144
Photographie 12 : Le Dardaillon à Lunel-Viel, Hérault (source : BURGEAP)	163
Photographie 13 : Rupture de la digue de l'Agly, sur la commune de Pia en mars 2013	164
Photographie 14 : Aspect « naturel » de la Meurthe, en amont de Nancy	165
Photographie 15 : La Meurthe recalibrée, dans la traversée urbaine de Nancy	166
Photographie 16 : Contact entre le lit majeur de la Meurthe et une terrasse alluviale à Nancy.....	166
Photographie 17 : Transition entre le lit majeur, plusieurs niveaux de terrasses alluviales et le versant, autour de la rivière Matane (Québec)	169
Photographie 18 : Transformateur électrique surélevé dans le lit majeur de la Matane	202
Photographie 19 : distinction entre le niveau 1 (lit moyen) et le niveau 2 (lit majeur), sur la rivière Matane...	203
Photographie 20 : Lit majeur, terrasse alluviale et versant autour de la rivière Matane	205

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les principaux atouts de la cartographie hydrogéomorphologique selon les services techniques de l'Etat	48
Tableau 2 : Les principales limites de la cartographie hydrogéomorphologique selon les services techniques de l'Etat	49
Tableau 3 : Les variables constitutives de l'analyse	64
Tableau 4 : Variables de l'AFCM.....	91
Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentages d'inertie de l'AFCM	91
Tableau 6 : Sections de contrôle de la Meurthe amont.....	133
Tableau 7 : Sections de contrôle pour la Meurthe aval	136
Tableau 8 : Comparaison des débits de la Q100 et du MNZI au droit des sections de contrôle de la Matane ..	139
Tableau 9 : Temps de réalisation d'un MNZI de 50 km.....	150
Tableau 10 : Avantages et inconvénients de la cartographie hydrogéomorphologique, du MNZI et d'une modélisation hydraulique	152
Tableau 11 : Nombre de localisations correctes et incorrectes de la zone inondable, en fonction du niveau de connaissance en géomorphologie.....	184
Tableau 12 : Réponses liées à l'homogénéité des hauteurs d'eau en lit majeur en fonction des connaissances en géomorphologie	184
Tableau 13 : Les 10 catégories de la table « S_INOP » (source DREAL Languedoc-Roussillon)	190
Tableau 14 : Valeurs de contrainte et de potentialité retenues	205
Tableau 15 : Proposition de zonage réglementaire du PPRI de la rivière Matane.....	225

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire relatif à la représentation de la cartographie hydrogéomorphologique, envoyé aux DDT99

Question 1 : De quelle DDT dépendez-vous ? (*Question ouverte*)

Question 2 : Avez-vous des Atlas de Zones Inondables dans votre département ? (*Oui / Non*)

Question 3 : Tenez-vous compte de l'enveloppe du lit majeur déterminée par hydrogéomorphologie dans le cadre de la mise en place des Plans de Prévention des Risques Inondation ? (*Oui / Non / Je ne sais pas*)

Question 4 : Pour les cartes d'aléa des PPRI, utilisez-vous le terme "d'aléa résiduel" pour qualifier l'espace compris entre la zone inondée par la modélisation de la crue centennale ou crue de référence supérieure, et la limite externe du lit majeur ? (*Oui / Non / Je ne sais pas*)

Question 5 : Si oui, cet aléa résiduel est-il habituellement associé à des préconisations en termes de règles d'urbanisme, de réduction de la vulnérabilité ou autre ? (*Question ouverte*)

Question 6 : Quelles-sont selon vous les principaux atouts de cartographie hydrogéomorphologique ? (*Question ouverte*)

Question 7 : Ses principales limites ? (*Question ouverte*)

Question 8 : Considérez-vous que la cartographie hydrogéomorphologique est amenée à se développer dans votre territoire ? (*Oui / Non*)

Question 9 : Pensez-vous que la cartographie des zones inondables qui sera réalisée d'ici fin 2013, dans le cadre de la Directive 2007/60/CE remettra en cause une partie des PPRI déjà approuvés ? (*Oui / Non*)

Question 10 : Quels changements pensez-vous que la Directive 2007/60/CE apportera dans la gestion du risque inondation dans votre territoire ? (*Question ouverte*)

Question 11 : Comment pensez-vous que sera estimée la "crue de faible probabilité" demandée dans la directive 2007/60/CE ? (*Question ouverte*)

Question 12 : Combien de classes d'aléa utilisez-vous pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques d'Inondation ? (*1 / 2 / 3 / 4 / plus*)

Question 13 : Quels-sont les critères retenus pour la qualification de l'aléa inondation, dans le cadre des PPRI ? (*Question ouverte*)

Question 14 : Avez-vous d'autres remarques ? (*Question ouverte*)

⁹⁹ Les questions suivantes sont extraites du questionnaire original sous forme électronique

Annexe 2 : Questionnaire relatif à la représentation de la cartographie hydrogéomorphologique, envoyé aux DREAL100

Question 1 : A quelle DREAL Appartenez-vous ? (*Question ouverte*)

Question 2 : Existe-t-il des Atlas de Zones Inondables par approche hydrogéomorphologique dans votre région ? (*Oui / Non / Je ne sais pas*)

Question 3 : Quels-sont selon vous les facteurs qui déterminent le développement d'AZI par approche hydrogéomorphologique ? (*Question ouverte*)

Question 4 : Quels sont les principaux avantages de la méthode ? (*Question ouverte*)

Question 5 : Ses principales limites ? (*Question ouverte*)

Question 6 : Pensez-vous que la limite externe du lit majeur hydrogéomorphologique corresponde aux contours de l'aléa de faible probabilité demandée par la Directive Inondation 2007/60/CE ? (*Oui / Non / Je ne sais pas*)

Question 7 : Comment une cartographie hydrogéomorphologique se situe-t-elle par rapport à une crue millénaire modélisée ? (*Moins large / Plus large / Equivalent / Variable d'un site à l'autre / Je ne sais pas*)

Question 8 : La survenue de crues extrêmes sur votre territoire est-elle une condition indispensable pour rendre légitime la cartographie hydrogéomorphologique ? (*Oui / Non / Je ne sais pas*)

Question 9 : Pensez-vous que certaines cartographies hydrogéomorphologiques sont aberrantes, que les parties externes du lit majeur ne seront jamais inondées ? (*Oui / Non*)

Question 10 : Avez-vous d'autres remarques ? (*Question ouverte*)

¹⁰⁰ Les questions suivantes sont extraites du questionnaire original sous forme électronique

Annexe 3 : Entretien avec Hubert Clapet au sujet des Atlas de Zone Inondable dans la région Basse-Normandie

(AM) Les AZI de Basse-Normandie sont-ils bien une combinaison de données historiques et géomorphologique ? C'est que je comprends en lisant le document « L'Atlas des Zones Inondables de Basse-Normandie ». Par ailleurs je ne suis pas sûr de la date et des références du document.

(HC) On se base toujours, si nous avons l'information, sur des événements connus (PHEC). Il faut reconnaître que c'est assez rare et limité la plupart du temps aux zones à enjeux. L'HGM à proprement parler intervient ensuite. La plaquette en question a été publiée en 2006. La couverture de l'AZI a encore été densifiée depuis.

(AM) Quand a débuté la réalisation de ces AZI ?

(HC) Voir pièce jointe. En 1995 en « bénéficiant » d'une crue généralisée et relativement marquée sur la région (réurrence moyenne environ 30 ans). La première publication a eu lieu en 1996 (documents papier mais l'information était sous forme numérique, ce qui a permis de faire vivre l'AZI très simplement ensuite). A l'époque, il ne s'agissait que de couvrir les zones à plus forts enjeux. Depuis, j'ai pris la liberté de pousser la démarche sur le maximum de cours d'eau (tout n'est pas encore fini). En effet, les services chargés de l'urbanisme sont souvent désarmés face à ce risque. D'autre part, beaucoup de communes apprécient de disposer de l'information pour établir leurs documents d'urbanisme. Enfin, on peut considérer que ZI = lit majeur. Si la notion de ZI est évoquée en matière de risques, celle de lit majeur sert de référence aux services de police de l'eau (loi sur l'eau notamment). Il devient alors assez logique de vouloir publier l'ensemble des ZI, c'est à dire des lits majeurs. Je crains simplement de ne pas avoir le temps de terminer la couverture de la région avant mon départ en retraite, compte tenu du fait que ma fonction sur ce thème ne couvre que 10 % environ de mon activité.

(AM) Quel a été le facteur déclencheur du choix de cette méthode dans la région ?

(HC) La crue de janvier 1995 a été l'occasion de faire beaucoup de relevé au sol ainsi que des survols en avion. Les photos ont été ensuite interprétées. Un appel à témoignages et l'interrogation des communes concernées ont permis de construire la couche des PHEC. La superposition quasi parfaite de l'emprise avec les zones d'alluvions modernes nous a incités à nous intéresser à l'HGM. Contrairement à ce qu'on peut penser cette méthode s'adapte assez bien à notre région. Par contre, nous ne voyons pas apparaître de lit « moyen ». Le lit majeur est souvent atteint bien en deçà de l'inondation centennale. La région BN est relativement préservée d'aménagements importants sur les cours d'eau. En dehors des zones urbanisées, les débordements sont donc souvent « naturels ». Cela facilite la mise en place de l'HGM.

(AM) Avez-vous des exemples de conflits liés à une cartographie hydrogéomorphologique (limites qui semble irréalistes). La question du sénateur Ambroise Dupont (2005) au ministre de l'époque semble y faire allusion pour la Basse-Normandie.

(HC) Ambroise Dupont se faisait l'écho du mécontentement des maires du Calvados. Le problème n'était pas tant le zonage de l'aléa que l'interprétation qui en était faite par les

services instructeurs. La tendance en DDE 14 était d'interdire purement et simplement tout projet en ZI. A la suite de ça, nous avons mis en place des réunions d'information et de formation auprès des services en question pour les sensibiliser à un traitement plus adapté afin d'éviter que le dossier concernant une bordure de ZI (peu d'eau, peu de vitesse, touchée très rarement) ne soit traité comme celui qui concerne un projet en pleine ZI. Une ligne de conduite a été donc établie en DDE 14, reprise pour l'essentiel dans le 50 et le 61 ensuite. Comme souvent, cet épisode a montré que la définition de l'aléa n'est pas tant contesté que les aspects réglementaires. Les autres cas de mises en cause du tracé ne touchaient pas à la méthode mais à la précision du résultat, lié très souvent à celle des MNT. Dans la majorité des cas, je demande au pétitionnaire (généralement la commune) de me fournir un levé topo qui soit plus précis que ce dont je dispose. Une nouvelle analyse avec ces éléments permet ensuite d'apporter éventuellement une correction (qui ne s'applique dans le sens désiré par le demandeur qu'une fois sur deux environ). Dans les cas les plus difficiles, une visite de terrain a toujours permis de valider l'approche en apportant cette précision recherchée. Dans notre région, l'HGM n'a finalement pas réellement été remise en question. Le souci est venu du fait que l'AZI est publié au 1/25000, comme il a été défini au départ et qu'il est utilisé essentiellement à l'échelle cadastrale, même si ses limites sont clairement annoncées.

(AM) A votre avis, pourquoi la cartographie hydrogéomorphologique ne s'est pas développée dans d'autres régions de France où les cours d'eau ont pourtant un fonctionnement proche ?

(HC) L'HGM a été mise au point dans le sud et beaucoup de gens pensent qu'elle ne s'applique que dans ces régions. De plus, elle nécessite une capacité d'analyse qui est de plus en plus difficile à mobiliser. A mon avis, le résultat est d'autant meilleur que la personne connaît bien la région et les cours d'eau sur lesquels elle travaille. On ne s'improvise pas hydrogéomorphologue et l'apprentissage a souvent besoin de se faire par accompagnement. C'est donc de plus en plus difficile à mettre en place. J'ai souvent remarqué également le côté « rassurant » des résultats chiffrés. Même si la précision n'est pas meilleure, un calcul hydraulique pèse souvent plus lourd sur les esprits. On est alors sur des arguments non rationnels qui touchent plus à la psychologie. Il serait néanmoins intéressant de connaître les arguments des services en question.

Annexe 4 : Données issues de l'analyse des PPRI

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type de la référence	Année d'une éventuelle crue historique de référence		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						de référence	référence		
01_1	Saône aval	non	1998	1997	hist	1840		DDT	HYDRATEC
03_1	Plaine d'Allier	non	2008	2001	hist	1866		Cartorisque	ND
03_2	Aurance	non	1999	1997	hist	1940		Cartorisque	ND
03_3	Rivière Allier	non	2001	1998	hist	1866		Cartorisque	EGIS
03_4	Val d'Allier	non	2006	2003	hist	1856		Cartorisque	EGIS
06_1	Siagne	non	2000	1994	hist	1996		Internet	EGIS
07_1	Deume	non	2008	2002	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
07_2	Doux	non	1999	1997	Q100	aucune		DDT	EGIS
07_3	Eyrieux	non	2005	2002	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
07_4	Chassezac	ss enjeux	2004	2002	Q100	aucune		DDT	BRL
07_5	Ardèche	non	2005	2001	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
08_1	Aisne	non	2002	1997	Q100	aucune		DDT	EGIS
08_2	Meuse aval	cité	1999	1996	Q100	aucune		DDT	EGIS
08_3	Meuse amont	non	2003	2000	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
08_4	Semoy	non	2005	2001	Q100	aucune		DDT	ALGÉORISQUE
09_1	Salat	non	2003	2001	Q100	aucune		Internet	RTM
10_1	Seine	non	2001	1999	hist	1955		Internet	BRL
11_1	Le Trapel	résid	2003	2000	Q100	aucune		DDT	SIEE
11_2	Orbiou	résid	2004	2000	hist	1999		DDT	SOGREAH
11_3	Cesse	cité	2010	2000	hist	1999		DDT	SOGREAH
11_4	Verdoble	résid	2005	2000	Q100	aucune		DDT	ISL
11_5	Fresquel	résid	2010	2007	Q100	aucune		DDT	BRL
12_1	Lot aval	réf	2010	2007	hist	1927		Cartorisque	SOGREAH
12_2	Lot amont	résid	2001	1996	hist	1920		Cartorisque	CETE
12_3	Tarn	réf	2004	1999	hist	1982		Cartorisque	EGIS
12_4	Aveyron amont	ss enjeux	2006	2001	hist	1930		Cartorisque	ND
12_5	Sortgues Dourdou	ss enjeux	2003	2001	hist	1982		Cartorisque	ND
13_1	Huveaune	non	1999	1985	Q100	aucune		Internet	CETE
13_2	Marignane	non	2000	1998	Q100	aucune		Internet	SOGREAH
13_3	Jaret	non	1999	1997	Q100	aucune		Internet	ND
13_4	Arc - val des Essarrettes	non	1999	1997	Q100	aucune		Cartorisque	SCP
14_1	Basse vallée de l'Orne	ss enjeux	2008	2005	Q100	aucune		DDT	ND
14_2	Basse vallée de la Touques	réf	2005	2001	HGM	1994		DDT	GINGER
14_3	Touques Moyenne	non	2010	2006	hist	1878		DDT	GINGER
15_1	Ander	ss enjeux	2005	2000	Q100	aucune		Cartorisque	CETE
15_2	Cère, Jordane et Riou Mamou	cité	2003	1999	Q100	aucune		Cartorisque	CETE

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type d'aléa de référence	Année d'une éventuelle crue historique de		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						référence	référence		
15_3	Célé - Rance	résid	2002	1999	hist	1958		Cartorisque	GEOSPHAIR
15_4	Veronne	cté	2005	2000	Q100	aucune		Cartorisque	LRPC
16_1	Vallée de la Tardoire	non	2002	2000	hist	1982		Cartorisque	SOGREAH
16_2	Vallée de la Vienne	non	2003	2000	hist	1944		Cartorisque	Etudes & Projets
16_3	Vallée de la Charente et de l'Argent- Or	réf	2002	2001	hist	1982		Cartorisque	Etudes & Projets
16_4	Bandiat	non	2002	2000	Q100	aucune		Cartorisque	SOGREAH
17_1	Charente amont	non	2009	2006	hist	1982		Cartorisque	SOGREAH
17_2	Boutonne	non	1996	1995	hist	1982		Cartorisque	ND
18_1	Cher	non	2005	1999	hist	1940		DDT	ND
18_2	Yèvre	non	2008	2006	hist	1940		DDT	CETE
18_3	Arnon	non	2004	2002	hist	1910		DDT	CETE
18_4	Arnon, Cher et Yèvre à Vierzon	non	2007	2002	Q100	aucune		DDT	INGEROP
19_1	Corrèze amont	cté	2006	2003	hist	1960		Cartorisque	EGIS
19_2	Vezière	non	2002	2000	hist	1960		Cartorisque	ND
21_1	Saône	non	2006	2001	Q100	aucune		Cartorisque	ALPGEORISQUE
21_2	Seine	cté	2002	1999	hist	1910		Cartorisque	IPSEAU
21_3	Ouche	non	2001	1998	Q100	aucune		Cartorisque	SILENE
22_1	Léguer	cté	2009	2002	Q100	aucune		Cartorisque	ISL
22_2	Blavet	cté	2008	2001	hist	1974		Cartorisque	EGIS
22_3	Quinic	ss enjeux	2011	2001	Q100	aucune		Cartorisque	CETE
22_4	Arguenon	non	2005	2001	Q100	aucune		Cartorisque	EGIS
22_5	Trieux	non	2004	2001	Q100	aucune		Cartorisque	EGIS
23_1	Creuse et Beauce	non	2005	1998	hist	1960		Cartorisque	CETE
23_2	Voueize et Tardes	non	2000	1998	hist	1960		Cartorisque	SOGREAH
23_3	Creuse et Rosaille	non	2004	1998	Q100	aucune		Cartorisque	CETE
24_1	Beauronne	ss enjeux	2012	2010	hist	2007		DDT	EGIS
24_2	Vallée de l'Isle	non	2000	1989	Q100	aucune		Cartorisque	ND
25_1	Doubs Central	non	2008	2001	Q100	aucune		Cartorisque	ISL
25_2	Doubs et Allan	non	2005	2000	Q100	aucune		Cartorisque	SILENE
25_3	Savoureuse	non	2005	2000	Q100	aucune		Cartorisque	SILENE
27_1	Iton à Evreux	non	2000	1997	hist	1881		DDT	ND
27_2	Epte Aval	résid	2005	2001	Q100	aucune		DDT	ND
27_3	Eure Aval	non	2003	2001	hist	1881		DDT	SOGREAH
27_4	Boucle de Poses (Seine)	non	2002	2001	hist	1910		DDT	ND
27_5	Risle	non	2006	2001	hist	2001		Cartorisque	SAFEGE
27_6	Vallée de l'Avre	non	2002	2001	hist	1881		Cartorisque	ND

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type de la référence	Année d'une éventuelle crue		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						historique de référence	référence		
27_7	Eure	ss enjeux	2011	2001	hist	1841		DDT	CETE
27_8	Iton	non	2007	2001	Q100	aucune		DDT	ISL
29_1	Aulne	non	2005	2001	Q100	aucune		DDT	ND
29_2	Mignonne	non	2009	2001	Q100	aucune		DDT	EGIS
29_3	Faou	non	2009	2001	Q100	aucune		DDT	EGIS
29_4	Elorn	non	2005	2000	Q100	aucune		DDT	ND
29_5	Morlaix	non	2004	2001	Q100	aucune		DDT	ND
29_6	Odet	non	2008	2007	Q100	aucune		DDT	ND
29_7	Isole	cté	2004	2001	Q100	aucune		DDT	ND
2A_1	Liscia	ss enjeux	2004	1997	Q100	aucune		Internet	EGIS
2A_2	Baracci	non	2004	1997	Q100	aucune		Internet	EGIS
2B_1	Figarella	non	2009	2000	Q100	aucune		Cartoristique	EGIS
2B_2	Furiani	non	2004	2001	Q100	aucune		Cartoristique	EGIS
2B_3	Ambatesco	non	2001	1996	Q100	aucune		Cartoristique	SAFEGE
30_1	Moyen Vidourle	résid	2008	2002	hist	2002		DDT	SAFEGE
30_10	Basse plaine Vidourle	résid	2012	2008	hist	2002		DDT	SAFEGE
30_2	Gradons d'Ales	résid	2010	2001	hist	2002		DDT	GINGER
30_3	Rhône Cèze Tave	non	2000	1995	hist	1856		DDT	ND
30_4	Haut-Vidourle	cté	2001	1996	Q100	aucune		DDT	EGIS
30_5	Cèze Aval	résid	2011	2002	hist	2002		DDT	BRL
30_6	Arre Inférieure	non	1998	1996	Q100*1,8	aucune		DDT	SAFEGE
30_7	Gardon Amont	résid	2008	2001	hist	2002		DDT	BRL
30_8	Nîmes	résid	2012	2008	hist	1988		DDT	CETE
30_9	Cèze Amont	résid	2011	2001	Q100	aucune		DDT	BRL
31_1	Garonne Nord	cté	2006	2001	hist	1875		Cartoristique	SOGREAH
31_2	Toulouse	résid	2011	2002	hist	1875		Internet	SOGREAH
33_1	Vallée de la Garonne	ss enjeux	2005	1997	Q100	aucune		DDT	EGIS
34_1	Etang de l'Or Nord	ss enjeux	2004	2002	Q100	aucune		DDT	EGIS
34_2	Moyenne vallée de l'Hérault	ss enjeux	2005	2001	hist	1907		DDT	SAFEGE
34_3	Moyenne vallée de l'Orb	cté	2002	1997	Q100	aucune		DDT	ND
34_4	Haute Vallée de l'Hérault	non	2001	2000	hist	1958		DDT	ND
34_5	Etang de Thau	non	2012	2007	Q100	aucune		DDT	EGIS
34_6	Salsion	réf	2003	2001	Q100	aucune		DDT	ND
34_7	Orb	non	2000	1997	Q100	aucune		DDT	ND
35_1	Seiche et Ise	non	2008	2001	Q100	aucune		Internet	EGIS
35_2	Vilaine aval	non	2002	1997	hist	1995		Internet	EGIS

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type d'aléa de référence	Année d'une éventuelle crue		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						historique de référence	référence		
35_3	Vilaine amont	non	2007	2001	hist	1974		Internet	SOGREAH
35_4	Meu, Garun et Vaunoise	non	2005	2001	Q100	aucune		Internet	ZEMA
36_1	Indre	non	2004	1999	Q100	aucune		Cartorisque	BETTURE CEREC
36_2	Creuse	non	2000	1999	hist	1960		Cartorisque	EGIS
38_1	Isère Amont	non	2007	2004	hist	1859		Internet	SOGREAH
38_2	Bourbre moyenne	cité	2008	2004	Q100	aucune		Internet	SOGREAH
38_3	Isère Aval	non	2007	2004	hist	1859		Internet	SOGREAH
39_1	Bièvre-Tacon	non	1998	1996	hist	1991		Cartorisque	SILENE
39_2	Vallère	ss enjeux	2007	2001	Q100	aucune		Cartorisque	ND
40_1	Adour - Luy	non	2005	1998	hist	1952		DDT	SOGREAH
40_2	Gave	non	2005	1997	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
40_3	Midouze	non	2010	2004	hist	1843		DDT	ND
41_1	Loir	non	2003	1998	Q100	aucune		Cartorisque	HYDRATEC
42_1	Lignon	non	2002	2001	Q100	aucune		DDT	SIEE
42_2	Loire Aval	non	2001	2000	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
42_3	Furan	non	2005	2001	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
42_4	Renaison	non	2008	2003	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
42_5	Oudan	ss enjeux	2003	1999	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
42_6	Sornin	non	2003	2002	Q100	aucune		DDT	EGIS
42_7	Loire	non	2001	1999	Q100	aucune		DDT	SOGREAH
44_1	Sèvre Nantaise	non	1998	1997	hist	aucune		Cartorisque	ND
44_2	Loire Amont	non	2001	1999	hist	1910		Cartorisque	ND
44_3	Moine	résid	2008	2006	Q100	aucune		Cartorisque	ND
45_1	Val de Briare	cité	2003	2001	hist	1866		Cartorisque	ND
45_2	Loing Aval	non	2007	2003	Q100	aucune		Cartorisque	SILENE
45_3	Val de Gien	non	2002	2001	hist	1866		Cartorisque	ND
45_4	Val d'Orléans	non	2001	1999	hist	1866		Cartorisque	ND
45_5	Val de Sully	non	2001	2000	hist	1866		Cartorisque	ND
46_1	Cèle Amont	ss enjeux	2003	1999	hist	1906		DDT	GEOSPHAIR
46_2	Cahors	non	2004	1998	hist	1927		DDT	GEOSPHAIR
46_3	Dordogne Aval	non	2006	2003	hist	1952		DDT	GEOSPHAIR
46_4	Dordogne Amont	non	2005	1999	hist	1952		DDT	GEOSPHAIR
46_5	Lot Aval	résid	2008	2003	hist	1927		DDT	GEOSPHAIR
46_6	Cléou-Bléou	non	2010	2006	hist	1960		DDT	GEOSPHAIR
49_1	Oudon-Mayenne	cité	2005	2001	hist	1995		Cartorisque	ND
49_2	Confluence Maine	cité	2009	2004	hist	1995		DDT	ND

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type de la référence	Année d'une événementielle crue		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						historique de référence	référence		
49_3	Sarthe	non	2006	2004	hist	1995	Cartorisque	ND	
49_4	Affluents de l'Oudon	non	2009	2008	Q100	aucune	DDT	ND	
49_5	Val du Louet	non	2002	2001	hist	1995	DDT	ND	
49_6	Val d'Aurthion	non	2000	1999	hist	1856	Cartorisque	ND	
50_1	Divette	réf	2007	2000	HGM	aucune	DDT	ALPGEORISQUE	
50_2	Vire	non	2004	2000	Q100	aucune	DDT	SCE	
50_3	Sée	ss enjeux	2007	2000	Q100	aucune	DDT	ALPGEORISQUE	
50_4	Sienne	ss enjeux	2004	2000	Q100	aucune	DDT	SCE	
53_1	Mayenne	non	2003	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SCE	
53_2	Jouanne	non	2007	2001	Q100	aucune	Cartorisque	SCE	
53_3	Ernée	non	2006	2001	Q100	aucune	Cartorisque	SCE	
53_4	Oudon	non	2004	2001	Q100	aucune	Cartorisque	ISL	
54_1	Meurthe	non	2010	2009	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
54_2	Moyenne Moselle	non	2000	1998	hist	1947	Cartorisque	BETURE CEREC	
54_3	Orne	ss enjeux	2009	2002	Q100	aucune	Cartorisque	EGIS	
54_4	Meurthe - Nancy	non	2012	2009	hist	1947	DDT	SOGREAH	
55_1	Meuse	non	2005	2002	Q100	aucune	Cartorisque	EGIS	
55_2	Ornain	non	2004	2000	Q100	aucune	Cartorisque	ND	
55_3	Orne	non	2003	1997	Q100	aucune	Cartorisque	EGIS	
55_4	Ornel	non	2005	2003	Q100	aucune	DDT	ISL	
56_1	Scorff	non	2003	2001	Q100	aucune	Cartorisque	ND	
56_2	Blavet amont	non	2005	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
56_3	Blavet aval	non	2001	1998	Q100	aucune	Cartorisque	SAFEGE	
57_1	Sarre	non	2000	1996	Q100	aucune	Cartorisque	ISL	
57_2	Seille aval	non	2002	2001	Q100	aucune	Cartorisque	INGEROP	
57_3	Moselle	ss enjeux	2006	2003	hist	1947	Cartorisque	SOGREAH	
58_1	Yonne Clamecy	résid	2009	2002	hist	1836	DDT	GINGER	
58_2	Yonne Corbigny	réf	2008	2002	HGM	aucune	DDT	GINGER	
58_3	Nohain	ss enjeux	2010	2002	Q100	aucune	DDT	GINGER	
58_4	Nièvre	non	2010	2002	Q100	aucune	DDT	ALPGEORISQUE	
58_5	Garat et Guignon	cté	2010	2002	Q100	aucune	DDT	ND	
59_1	Soire	non	2008	2007	Q100	aucune	DDT	SAFEGE	
59_2	Lys aval	non	2005	2000	Q100	aucune	DDT	SOGREAH	
59_3	Yser	non	2007	2007	Q100	aucune	DDT	EGIS	
60_1	Oise -Noyonnais	non	2007	2001	hist	1993	DDT	GINGER	
60_2	Thérain aval	non	2005	2001	Q100	aucune	DDT	ISL	

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type d'aléa de référence	Année d'une éventuelle crue		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						historique de référence	référence		
60_3	Oise	non	2000	1997	hist	1995	DDT	SNSSeine	
61_1	Sarthe	non	2001	1997	Q100	aucune	DDT	ND	
61_2	Orne Amont	ss enjeux	2012	2003	Q100	aucune	DDT	GINGER	
61_3	Risle	non	2004	2000	Q100	aucune	DDT	ND	
61_4	Huisne	non	2006	2002	Q100	aucune	DDT	ND	
61_5	Vée	non	2002	1999	Q100	aucune	DDT	ND	
62_1	Aa	non	2009	2000	hist	2002	DDT	SOGETI	
62_2	Liane	non	1999	1996	Q100	aucune	DDT	ND	
62_3	Canche	non	2003	2000	Q100	aucune	DDT	SOGREAH	
63_1	Veyre	ss enjeux	2008	1998	Q100	aucune	DDT	Antea	
63_2	Bedat	cité	2002	1999	Q100	aucune	Cartorisque	LRPC	
63_3	Auzon	cité	2007	1998	Q100	aucune	DDT	SILENE	
63_4	Tiretaine	non	2002	1998	ND	aucune	Cartorisque	LRPC	
63_5	Couze - Chambon	réf	2008	1999	HGM	aucune	DDT	EGIS	
63_6	Artière	non	2002	1998	ND	aucune	Cartorisque	LRPC	
64_1	Ousse	non	2002	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
64_2	Lagoin	non	2005	2003	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
64_3	Gave de Pau	non	2007	2003	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
65_1	Adour	non	2010	2003	Q100	aucune	Internet	ND	
66_1	Boules	cité	2012	2008	hist	1940	DDT	GINGER	
66_2	Tech Aval	résid	2012	2006	hist	1940	DDT	GINGER	
67_1	Mossig	cité	2007	2004	Q100	aucune	Cartorisque	INGEROP	
68_1	Largue	non	1998	1996	Q100	aucune	Cartorisque	ND	
68_2	Ill	non	2006	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SAFEGE	
68_3	Fecht	non	2008	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SAFEGE	
68_4	Thur	non	2003	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
68_5	Lauch	non	2006	1997	Q100	aucune	Cartorisque	SOGREAH	
69_1	Garon	non	2007	2003	Q100	aucune	DDT	SOGREAH	
69_2	Rhône amont	ss enjeux	2008	2004	hist	1840	DDT	EGIS	
69_3	Azergues	ss enjeux	2008	2003	Q100	aucune	DDT	GEO+	
69_4	Saône	non	2006	1996	hist	1840	DDT	EGIS	
69_5	Ravin	ss enjeux	1998	1997	Q100	aucune	DDT	ND	
69_6	Grand Lyon	non	2008	2004	hist	1840	DDT	EGIS	
69_7	Yseron	non	1998	1994	Q100	aucune	DDT	IPSEAU	
69_8	Rhins-Trambouze	non	2009	2006	Q100	aucune	DDT	ND	
70_1	Semouse	non	2007	2000	Q100	aucune	Cartorisque	ND	

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type d'aléa de référence	Année d'une éventuelle crue		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						historique de référence	référence		
70_2	Ognon aval	non	2002	1997	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	ND
70_3	Saône	non	2007	1998	hist	1840	1840	Cartorisque	SOGREAH
71_1	Saône	non	1998	1996	hist	1840	1840	Cartorisque	ALPGEORISQUE
71_2	Bourbince	non	2009	2003	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	SAFEGE
71_3	Loire	non	2001	1997	hist	1846	1846	Cartorisque	ND
71_4	Saône	non	2004	2000	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	SOGREAH
71_5	Botoret	non	2005	2002	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	HYDRATEC
72_1	Sarthe - Le Mans	non	2001	1998	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	EGIS
72_2	Loir - La Flèche	non	1998	1996	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	HYDRATEC
73_1	Leysse	non	1999	1993	Q100	aucune	aucune	Internet	BETURE CEREC
74_1	Arve	non	2001	2001	ND	aucune	aucune	Internet	RTM
74_2	Giffre	non	2004	2002	Q100	aucune	aucune	DDT	SAFEGE
75_1	Paris	non	2003	1998	hist	1910	1910	Cartorisque	ND
76_1	Arques	non	2007	2001	hist	1999	1999	DDT	ND
76_2	Dun	non	2011	2001	hist	1999	1999	DDT	EGIS
76_3	Seie	non	2002	1996	hist	1999	1999	DDT	ND
76_4	Durdent	non	2002	1996	hist	1999	1999	DDT	ND
76_5	Seine - Rouen	non	2009	1999	hist	1910	1910	DDT	ND
77_1	Seine	non	2002	1999	hist	1910	1910	DDT	ND
77_2	Loing	non	2006	2001	hist	1910	1910	DDT	1D
77_3	Marne	non	2007	2004	hist	1910	1910	DDT	ND
77_4	Seine aval	non	2002	1998	hist	1910	1910	DDT	ND
77_5	Grand Morin	non	2006	2005	Q100	aucune	aucune	DDT	ND
78_1	Mauldre	non	2006	2002	Q100	aucune	aucune	DDT	ND
78_2	Seine - Oise	non	2007	1998	hist	1910	1910	DDT	ND
79_1	Sèvre Niortaise	non	1998	1996	Q100	aucune	aucune	Cartorisque	ND
80_1	Somme	résid	2012	2001	hist	2001	2001	DDT	SAFEGE
80_2	Selle	ss enjeux	2008	2005	HGM	aucune	aucune	DDT	ALPGEORISQUE
80_3	Ancre	non	2008	2005	HGM	aucune	aucune	DDT	ALPGEORISQUE
81_1	Tarn Albigeois	réf	2004	2001	hist	1930	1930	DDT	GEOSPHAIR
81_2	Agout amont	résid	2004	2001	hist	1861	1861	DDT	BETURE CEREC
81_3	Agout aval	non	2002	2001	hist	1930	1930	DDT	GEOSPHAIR
81_4	Durenque	réf	2006	2002	hist	aucune	aucune	DDT	GEOSPHAIR
83_1	Bornes	non	2000	1997	Q100	aucune	aucune	Internet	SIEE
83_2	Cogolin	non	2005	1997	Q100	aucune	aucune	Internet	EGIS
83_3	Nartuby	non	2005	1997	Q100	aucune	aucune	Internet	EGIS

Code du PPRI	Nom du PPRI	Utilisation de l'HGM	Année approbation	Année de prescription	Type d'aléa de référence	Année d'une événementielle crue		Source du document	Bureau d'étude cité pour l'analyse de l'aléa
						historique de référence	référence		
83_4	Pédégal - Valescure	ss enjeux	2002	2000	Q100	aucune		Internet	SIEE
84_1	Mont Ventoux	ss enjeux	2007	2000	hist	1992		DDT	ND
84_2	Lez	cté	2006	2000	hist	1993		DDT	ND
84_3	Eze	ss enjeux	2001	1999	hist	1993		DDT	IPSEAU CAREX
84_4	Ouvéze	résid	2009	2000	hist	1992		DDT	
86_1	Vienna - Châtelleraut	non	1994	1988	Q100	aucune		Cartorisque	SOGREAH
86_2	Vienna - Chauvigny	non	2007	2003	hist	1913		Cartorisque	SOGREAH
86_3	Clain	non	2003	1986	hist	1982		Cartorisque	SOGREAH
87_1	Vienna aval	non	2007	2006	hist	1960		Cartorisque	LRPC
87_2	Valoine	non	2009	2006	Q100	aucune		Cartorisque	ISL
87_3	Aurence	non	2007	2006	hist	1993		Cartorisque	ND
87_4	Roselle	non	2008	2006	hist	1993		Cartorisque	BETURE CEREC
87_5	Ligoure	non	2008	2006	hist	1993		Cartorisque	ATEL
87_6	Loze	ss enjeux	2008	2006	hist	1993		Cartorisque	SOGREAH
89_1	Armançon	cté	2008	2000	hist	1910		DDT	SOGREAH
89_2	Cousin	ss enjeux	2010	2000	hist	1910		Internet	ALPGEORISQUE
89_3	Vrin	non	2005	1997	Q100	aucune		DDT	BIOS
89_4	Yonne	non	2005	1997	hist	1910		DDT	SILENE
90_1	Savourouse	non	1999	1996	Q100	aucune		Cartorisque	ND
90_2	Bourbeuse	non	2002	2000	hist	1990		Cartorisque	AQUA-PLUS
90_3	Allaine	non	2005	2002	Q100	aucune		DDT	SILENE
91_1	Essonne	ss enjeux	2012	2009	Q100	aucune		Internet	GSC
91_2	Yerres	ss enjeux	2012	2008	hist	1978		DDT	GINGER
92_1	Haut-de-Seine	non	2004	1998	hist	1910		Cartorisque	ND
93_1	Marne	non	2010	1999	hist	1910		Cartorisque	HYDRATEC
93_2	Seine	non	2007	2000	hist	1910		Cartorisque	HYDRATEC
94_1	Marne - Seine	non	2007	2003	hist	1910		Cartorisque	SAFEGE
95_1	Seine	non	2002	1999	hist	1910		Cartorisque	ND
95_2	Oise	non	2007	2005	hist	1926		Cartorisque	ND
95_3	Epte	non	2004	2004	Q100	aucune		Cartorisque	ISL

Annexe 5 : Guide SIG des AZI, DREAL Languedoc-Roussillon, 2010

Objets surfaciques

Nom informatique	Attribut	Valeur	Représentation	Attributs graphiques
S_INON	Unités hydrogéomorphologiques	01 : lit mineur		Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur I3
		02 : lit moyen		Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur I1
		03 : lit majeur		Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur L5
		04 : lit majeur exceptionnel		Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur H1
		05 : plan d'eau naturel		Style de polygone : trame E4, sans fond, couleur N1
		06 : plan d'eau artificiel		Style de polygone : trame E4, sans fond, couleur I1
		07 : étangs littoraux		Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur G10
		08 : plan d'eau artificiel ou naturel		Style de polygone : trame F7, sans fond, couleur N1
		09 : dépression pluviale		Style de polygone : trame F2, sans fond, couleur I1, contours : ligne A2, épaisseur 2 points, couleur I1
S_INOP	Zone d'inondation potentielle	02 : zone de débordements sur encaissant lié aux obstacles anthropiques		Style de polygone : trame C4, sans fond, couleur I1
		03 : zone de débordements sur encaissant lié aux phénomènes de sur-sédimentation		Style de polygone : trame G4, sans fond, couleur I1
		04 : zone de ruissellement pluvial agricole ou urbain en nappe		Style de polygone : trame C9, sans fond, couleur I1
		05 : zone d'incertitude		Style de polygone : trame C4, sans fond, couleur L1
		06 : zone de débordement sur cône		Style de polygone : trame H1, sans fond, couleur K7
		07 : zone de versant inondable par surcote		Style de polygone : trame G1, sans fond, couleur I1
		08 : zone de débordement sur terrasse ou colluvion		Style de polygone : trame D3, sans fond, couleur K10
		09 : zone de débordement sur versant		Style de polygone : trame E6, sans fond, couleur M4
		10 : zone de débordement prioritaire lors de crues des affluents sur la plaine alluviale du Rhône		Style de polygone : trame A12, sans fond, couleur A10, contours : ligne B1, épaisseur 1 point, couleur A10
		11 : Ancien étang asséché		Style de polygone : trame D11, sans fond, couleur I1
		S_ENCA	Encaissant	01 : colluvions
02 : terrasse alluviale				Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur F5
03 : versant				Style de polygone : trame E2, sans fond, couleur P3
S_OANT	Elément anthropique d'occupation du sol à rôle	01 : remblais		Style de polygone : trame B4, sans fond, couleur E1, contours : ligne C13, épaisseur 0,8 point, couleur E1
S_ONAT	Elément naturel d'occupation du sol à rôle	01 : atterrissement		Style de polygone : trame H7, sans fond, couleur E1
		02 : ripisylve		Style de polygone : trame E7, sans fond, couleur H12

Objets linéaires

Nom informatique	Attribut	Valeur	Représentation	Attributs graphiques		
L_HYDR	Entité hydrographique	01 : Cours d'eau naturel ou protégé		Style de polyligne : ligne D1, épaisseur 1,2 points, couleur L2		
		02 : voie d'eau souterraine		Style de polyligne : ligne D1, épaisseur 1,2 points, couleur K5		
		03 : voie d'eau artificielle		Style de polyligne : ligne D1, épaisseur 1,2 points, couleur I1		
L_INON	Unité hydrogéomorphologique	01 : lit mineur		Style de polyligne : ligne B1, épaisseur 1,2 points, couleur I1		
L_MORPH	Structures morphologiques	01 : versant		Style de polyligne : ligne B1, épaisseur 1,5 points, couleur O14		
		02 : pied de versant		Style de polyligne : ligne A2, épaisseur 1,5 points, couleur O14		
		03 : Falaise		Style de polyligne : ligne C8, épaisseur 1,5 points, couleur O14		
L_TAL_1	Structures morphologiques	02 : talus net <1 m		Style de polyligne : ligne B13, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
		03 : talus net (1 à 3 m)		Style de polyligne : ligne D12, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
		04 : talus net >3 m		Style de polyligne : ligne B30, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
		05 : talus peu marqué		Style de polyligne : ligne D8, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
L_TAL_2	Structures morphologiques	01 : talus net (sans indication de hauteur)		Style de polyligne : ligne B13, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
		02 : talus peu marqué		Style de polyligne : ligne D8, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
		03 : talus net (bas de talus)		Style de polyligne : ligne A3, épaisseur 0,7 points, couleur D1		
L_ENCA	Limite plaine alluviale fonctionnelle / encaissant	01 : Limite plaine alluviale nette		Style de polyligne : ligne B1, épaisseur 1,2 points, couleur O1		
		02 : Limite plaine alluviale imprécise		Style de polyligne : ligne A2, épaisseur 1,2 points, couleur O1		
		03 : Limite de la plaine alluviale du cours d'eau principal (imprécise)		Style de polyligne : ligne B21, épaisseur 0,8 points, couleur O1		
L_GEOM	Structures secondaires	01 : Axe d'écoulement d'une plaine alluviale peu marqué (affluent secondaire)		Style de polyligne : ligne B15, épaisseur 0,8 points, couleur I1		
		02 : Axe d'écoulement en crue (peu marqué)		Style de polyligne : ligne C15, épaisseur 1,3 points, couleur I1		
		03 : écoulement de versant		Style de polyligne : ligne C15, épaisseur 1 points, couleur J10		
		04 : bras de décharge annexe		Style de polyligne : ligne B13, épaisseur 0,9 points, couleur I1		
		05 : cône de déjection		Style de polyligne : ligne B1, épaisseur 1,4 points, couleur D1		
		06 : dépression de lit majeur		Style de polyligne : ligne B13, épaisseur 0,8 points, couleur I1		
		07 : érosion de berge		Style de polyligne : ligne B13, épaisseur 0,8 points, couleur E1		
		08 : ruissellement sur versant		Style de polyligne : ligne C15, épaisseur 1,3 points, couleur L14		
		09 : Secteur privilégié de sur-sédimentation en amont d'un remblai		Style de polyligne : ligne C29, épaisseur 0,8 points, couleur D12		
		10 : surcote		Style de polyligne : ligne C29, épaisseur 0,8 points, couleur I1		
		11 : bourelet de berge		Style de polyligne : ligne A11, épaisseur 0,8 points, couleur L1		
L_OANT	Elément anthropique d'occupation du sol à rôle hydrodynamique	01 : carrières		Style de polyligne : ligne C29, épaisseur 0,6 points, couleur E1		
		02 : digues		Style de polyligne : ligne B7, épaisseur 1 point, couleur E1		
		03 : front d'urbanisation		Style de polyligne : ligne A25, épaisseur 0,8 points, couleur E1		
		06 : lit rectifié, recalibré		Style de polyligne : ligne B1, épaisseur 0,8 points, couleur E1		
		07 : protection de berge		Style de polyligne : ligne A23, épaisseur 0,8 points, couleur E1		
		08 : remblais d'infrastructure		Style de polyligne : ligne B13, épaisseur 0,7 points, couleur E1		
		09 : effet de sur-cote en amont d'un obstacle anthropique		Style de polyligne : ligne C15, épaisseur 1,5 points, couleur M1		
		10 : ouvrage d'art		Style de polyligne : ligne A16, épaisseur 1 point, couleur E1		
		11 : seuil		Style de polyligne : ligne A16, épaisseur 1 points, couleur M1		
		12 : barrage		Style de polyligne : ligne B17, épaisseur 1,4 points, couleur M1		
		14 : remblais		Style de polyligne : ligne D12, épaisseur 0,7 points, couleur E1		
		L_ONAT	Elément naturel d'occupation du sol à rôle hydrodynamique	01 : Ripisylve de berge		Style de polyligne : ligne B21, épaisseur 0,8 points, couleur M1
		L_HIST	Limite d'extension des crues historiques	00 : Non renseigné		Style de polyligne : ligne C10, épaisseur 1 point, couleur G1
01 : Limite observée	01 : Crue antérieure à 1845			Style de polyligne : ligne A11, épaisseur 1 point, couleur G1		

Objets ponctuels

Nom informatique	Attribut	Valeur	Représentation	Attributs graphiques
P_GEOM	Structure secondaire	01 : point de débordement		Style de symbole : Wingdings A26, couleur E1, taille 12
		02 : point de résurgence		Style de symbole : Wingdings G27, couleur I1, taille 12
		03 : embâcle		Style de symbole : Wingdings B18, couleur K1, taille 12
P_OANT	Élément d'occupation du sol à rôle hydrodynamique	01 : bâtiment		Style de symbole : Map Info Cartographic B1, couleur E1, taille 8
		02 : camping		Style de symbole : Map symbol C4, couleur E1, taille 14
		03 : captage, prise d'eau		Style de symbole : Map Info Cartographic E3, couleur E1, taille 8
		04 : ouvrage d'art		Style de symbole : Map Info Cartographic G6, couleur C1, taille 12
		05 : seuil, barrage		Style de symbole : Map Info Cartographic G8, couleur I1, taille 12
		06 : pont		Style de symbole : Map Info Cartographic C6, couleur C1, taille 12
		07 : station d'épuration		Style de symbole : Map Info Cartographic B2, couleur E1, taille 8
		08 : station de pompage		Style de symbole : Map Info Cartographic B7, couleur E1, taille 10
		09 : source		Style de symbole : Map Info Cartographic D5, couleur I1, taille 12
		10 : épi		Style de symbole : Map Info Cartographic B6, couleur I1, taille 12
P_PHEC	Hauteurs d'eau/débits historiques	01 : PHEC		Style de symbole : Map symbol F2, couleur M1, taille 8, halo, gras
P_HIST	Point d'information historique	01 : repère (plaque, inscription) de crue sur point particulier (ouvrage, autres)		Style de symbole : Wingdings 2 E7, couleur M1, taille 10, halo, gras
		02 : information issue de témoignages		Style de symbole : Webdings B10, couleur M1, taille 10, halo, gras
		03 : information issue d'archives		Style de symbole : Map symbol A4, couleur M1, taille 10, halo, gras
P_REPR	Points représentatifs	02 : Photo		Style de symbole : Webdings G6, couleur E1, taille 16

Guide SIG AZI - DREAL LR - avril 2010

Table des matières

Sommaire	9
Introduction générale	11
Chapitre 1 - L'approche hydrogéomorphologique, une méthode de cartographie des zones inondables.....	17
1.1 Les grands concepts de la géomorphologie : fondements de la cartographie hydrogéomorphologique	18
1.1.1 Définition.....	18
1.1.2 Du cycle d'érosion aux types de lits fluviaux	18
1.2 Développement institutionnel de la cartographie hydrogéomorphologique.....	21
1.2.1 De la lutte contre les inondations à la cartographie de l'aléa	21
1.2.1.1 Maitriser la nature	21
1.2.1.2 La lutte contre les inondations.....	21
1.2.1.3 Les Plans de Surfaces Submersibles	22
1.2.1.4 Le tournant des années 1980 en France	23
1.2.2 Emergence de la cartographie hydrogéomorphologique en France	24
1.2.3 Approche géomorphologique des zones inondables dans la littérature anglo-saxonne.....	26
1.2.4 Hydrogéomorphologie : un terme, mais plusieurs sens selon les acteurs .	27
1.3 Les principes de la cartographie hydrogéomorphologique en France	28
1.3.1 L'interprétation hydrogéomorphologique	28
1.3.1.1 Les critères d'identification	28
1.3.1.2 Les méthodes	31
1.3.2 Les unités hydrogéomorphologiques.....	31
1.3.2.1 La zone inondable.....	32
1.3.2.2 L'encaissant.....	33
1.4 L'hydrogéomorphologie dans la pratique.....	34
1.4.1 La diffusion des cartographies hydrogéomorphologiques.....	34
1.4.2 Les différents types d'AZI hydrogéomorphologique	37
1.4.3 Les crues extrêmes : justification majeure du recours à la cartographie hydrogéomorphologique	40
1.4.4 Les cartographies HGM hors de France.....	41
1.5 Conclusions	42
Chapitre 2 - Évaluation de la place de la cartographie hydrogéomorphologique dans la gestion du risque inondation en France	45
2.1 La représentation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les services instructeurs	46
2.1.1 Méthodologie d'enquête par questionnaire	46
2.1.2 Les atouts de l'hydrogéomorphologie	48

2.1.3	Les limites de l'hydrogéomorphologie.....	49
2.1.4	Utilisation de l'hydrogéomorphologie pour les PPRI.....	50
2.1.5	La crue de faible probabilité de la« Directive Inondation ».....	52
2.1.6	Perspectives de développement de la cartographie hydrogéomorphologique	53
2.2	Les liens entre les AZI hydrogéomorphologiques et les PPRI	53
2.2.1	1 ^{er} cas de figure : l'AZI hydrogéomorphologique est disponible.....	54
2.2.2	2 ^{ème} cas de figure : l'AZI hydrogéomorphologique n'est pas disponible....	55
2.2.3	3 ^{ème} cas de figure : l'AZI hydrogéomorphologique n'est pas disponible et la compétence hydrogéomorphologie n'est pas maîtrisée	56
2.3	Analyse des PPRI et de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique	59
2.3.1	Méthodologie	59
2.3.2	Les documents récoltés	61
2.3.2.1	Contenu d'un rapport de présentation de PPRI.....	62
2.3.2.2	Evolution de la qualité graphique des documents.....	63
2.3.3	Descriptions des variables et de leurs modalités	64
2.3.3.1	Période d'approbation et de prescription	65
2.3.3.2	Les sources des documents	66
2.3.3.3	Crue de référence.....	68
2.3.3.4	Les crues historiques de référence des PPRI	69
2.3.3.5	Utilisations de la cartographie hydrogéomorphologique pour le diagnostic de l'aléa 71	
2.3.4	Usages réglementaires de la cartographie hydrogéomorphologique	74
2.3.4.1	Hydrogéomorphologie pour les affluents et les zones sans enjeux	75
2.3.4.2	Le cas particulier des PPRI de la région Midi-Pyrénées.....	77
2.3.4.3	Valeur réglementaire de l'aléa résiduel	78
2.3.4.4	L'hydrogéomorphologie en tant qu'aléa de référence	83
2.3.4.5	Une pratique innovante de l'hydrogéomorphologie : le Modèle Numérique de Zone Inondable (MNZI)	85
2.3.5	Prise en compte d'un évènement supérieur à la crue de référence sans cartographie hydrogéomorphologique : les pratiques	87
2.3.5.1	La « cote de sécurité »	87
2.3.5.2	La « crue exceptionnelle ».....	88
2.3.6	Variables clés dans émergence de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique dans les PPRI	90
2.4	Conclusions	95
Chapitre 3 - Le MNZI, un renouvellement efficace de la cartographie hydrogéomorphologique		
97		
3.1	Le MNZI : définition, réalisation et valorisation potentielle.....	99
3.1.1	Définition et réalisation d'un MNZI.....	99

3.1.1.1	Développement de la donnée LiDAR.....	100
3.1.1.2	Réalisation d'une cartographie hydrogéomorphologique.....	102
3.1.1.2.1	<i>Ce que recherche le géomorphologue</i>	102
3.1.1.2.2	<i>Les atouts du LiDAR pour la cartographie hydrogéomorphologique..</i>	103
3.1.1.3	Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers....	105
3.1.1.4	Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle...	107
3.1.1.5	Création d'un MNLE.....	109
3.1.1.6	Création d'un MNZI	110
3.1.2	La « Directive Inondation » : valorisation immédiate du MNZI ?	113
3.2	Sites d'étude	114
3.2.1	Gardon d'Alès	116
3.2.2	Argens	118
3.2.3	Meurthe amont et aval	120
3.2.4	Matane	121
3.2.5	Rivière Richelieu	123
3.3	Réalisation de MNZI.....	124
3.3.1	Gardon d'Alès	124
3.3.1.1	Cartographie hydrogéomorphologique	124
3.3.1.2	Positionnement des profils en travers	125
3.3.1.3	Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle du Gardon d'Alès	126
3.3.1.4	MNZI du Gardon d'Alès	126
3.3.2	Argens	128
3.3.2.1	Cartographie hydrogéomorphologique	128
3.3.2.2	Positionnement des profils en travers	129
3.3.2.3	Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur l'Argens	129
3.3.2.4	MNZI de l'Argens	130
3.3.3	Meurthe amont	131
3.3.3.1	Cartographie hydrogéomorphologique	131
3.3.3.2	Positionnement des profils en travers	132
3.3.3.3	Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur la Meurthe amont.....	133
3.3.3.4	MNZI de la Meurthe amont.....	133
3.3.4	Meurthe aval	134
3.3.4.1	Cartographie hydrogéomorphologique	134
3.3.4.2	Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers....	136
3.3.4.3	Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur la Meurthe aval	136
3.3.4.4	MNZI de la Meurthe aval	136
3.3.5	Matane	137
3.3.5.1	Cartographie hydrogéomorphologique	137

3.3.5.2	Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers....	138
3.3.5.3	Détermination d'une cote de crue par profil et sections de contrôle sur la Matane	139
3.3.5.4	MNZI de la Matane	140
3.3.6	Richelieu	141
3.3.6.1	Cartographie hydrogéomorphologique	142
3.3.6.2	Analyse des discontinuités et positionnement des profils en travers....	145
3.3.6.3	MNZI de la Richelieu	146
3.4	Mise en pratique du MNZI	149
3.4.1	Comparaison entre le temps de réalisation d'un MNZI et de modèles hydrauliques.....	149
3.4.1.1	Le MNZI	149
3.4.1.2	Les modèles hydrauliques.....	150
3.4.1.3	Avantages et inconvénients de chacune des approches	151
3.4.2	Un MNZI pour la « Directive Inondation » : retour d'expérience	152
3.5	Discussion	154
3.5.1	Apports des MNT LiDAR pour la cartographie des zones inondables et la réalisation de MNZI.....	154
3.5.2	Faisabilité de MNZI dans des milieux différents	157
3.5.3	La place du MNZI par rapport à la cartographie hydrogéomorphologique	157
3.5.4	L'emploi de MNZI pour représenter la crue extrême.....	158
3.6	Conclusions	159

Chapitre 4 - Application de la cartographie hydrogéomorphologique : imprécisions, incertitudes et niveau de confiance en fonction des environnements fluviaux

4.1	Exemples d'environnements complexes pour la réalisation de cartographies hydrogéomorphologiques	162
4.1.1	Les basses plaines	162
4.1.2	Le recalibrage de la Meurthe.....	164
4.1.3	Les héritages de l'Holocène	167
4.2	Imprécisions et incertitudes dans la cartographie hydrogéomorphologique	169
4.2.1	Les facteurs d'imprécision.....	170
4.2.1.1	Type de plaine alluviale.....	170
4.2.1.2	Apports de versant	171
4.2.2	Les facteurs d'incertitude	171
4.2.3	Le type des données topographiques.....	172
4.3	Le niveau de confiance : une combinaison des imprécisions et des incertitudes	172
4.3.1	Comparaison de différents sites	173
4.3.2	Analyse du niveau de confiance à l'échelle d'un bassin versant.....	174
4.4	Conclusions	175

Chapitre 5 - Axes de réflexion pour l'évolution de la cartographie hydrogéomorphologique 177

5.1	La simplification des AZI par approche hydrogéomorphologique : vecteur d'adhésion à la méthode ?.....	178
5.1.1	Compréhension de la cartographie hydrogéomorphologique	179
5.1.1.1	Méthodologie d'enquête par questionnaire	179
5.1.1.2	Résultats des questionnaires	181
5.1.2	Efficacité de la sémiologie graphique de la cartographie hydrogéomorphologique	184
5.1.3	Les lacunes des AZI par approche hydrogéomorphologique.....	186
5.1.3.1	Une légende très riche, mais largement sous exploitée.....	186
5.1.3.2	Une carte et non une information géographique	187
5.1.3.3	La distinction entre forme et processus : une réalité non prise en compte par la cartographie hydrogéomorphologique	187
5.1.3.4	La représentation des incertitudes et des imprécisions dans les AZI	189
5.1.4	Pour des AZI plus simples	192
5.1.5	La simplification des AZI : éléments de conclusion	195
5.2	La « cartographie positive » : une mise en valeur de l'interprétation hydrogéomorphologique	197
5.2.1	Inondations : du négatif au positif	197
5.2.2	Méthodologie	199
5.2.2.1	Choix des unités hydrogéomorphologiques	199
5.2.2.2	Choix des formes de mise en valeur.....	201
5.2.2.2.1	<i>Nouvelles habitations et activités économiques</i>	<i>201</i>
5.2.2.2.2	<i>Enjeux sensibles aux inondations et/ou utiles à la gestion de crise</i>	<i>201</i>
5.2.2.2.3	<i>Mise en valeur écologique</i>	<i>203</i>
5.2.2.2.4	<i>Agriculture</i>	<i>203</i>
5.2.2.3	Attribution des valeurs de contrainte et de potentialité.....	204
5.2.2.4	Visualisation des contraintes et potentialités par type de mise en valeur	205
5.2.2.5	Synthèse des potentiels	207
5.3	Conclusions	208

Chapitre 6 - Conditions et modalités du développement de la cartographie hydrogéomorphologique 211

6.1	Les conditions du développement de la cartographie hydrogéomorphologique ..	212
6.1.1	Les prérequis du développement	214
6.1.2	Phase de diagnostic	214
6.1.3	Leviers du changement.....	216
6.1.3.1	Communication et formation.....	216
6.1.3.2	Atlas de Zones Inondables et cartographie réglementaire	217

6.1.4	Phase de pilotage	217
6.2	Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique en France	218
6.2.1	La situation de la cartographie hydrogéomorphologique en France dans le processus de développement	218
6.2.2	Evolutions envisageables.....	218
6.2.2.1	Diversification des outils cartographiques.....	218
6.2.2.2	Diffusion des pratiques règlementaires	219
6.2.2.3	Diversification des milieux naturels	219
6.2.2.4	Approche naturaliste contre culte du chiffre	219
6.3	Le développement de la cartographie hydrogéomorphologique dans de nouveaux contextes environnementaux et règlementaires : l'exemple du Québec.....	220
6.3.1	La cartographie hydrogéomorphologique au Québec.....	220
6.3.2	Compatibilité entre la législation québécoise et l'approche hydrogéomorphologique	221
6.3.2.1	La réglementation de l'urbanisme en zone inondable au Québec	221
6.3.2.2	Différences entre l'application de la PPRLPI et de PPRI	222
6.3.2.3	Représentation des zones de grand courant et de faible courant : exemple de la rivière Bonaventure	222
6.3.2.4	Proposition d'application d'une réglementation de l'occupation du sol pour la PPRLPI à partir de la cartographie hydrogéomorphologique	224
6.3.3	Développement de la cartographie hydrogéomorphologique au Québec : éléments de conclusion	226
	Conclusion générale	229
	Références bibliographiques.....	239
	Liste des sigles et abréviations	251
	Liste des figures, photographies et tableaux	253
	Annexes	259
	Table des matières.....	275

L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisations et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables

Résumé

La connaissance de l'aléa inondation est un enjeu croissant pour la gestion du risque inondation. En France, afin de répondre à la demande des pouvoirs publics de cartographier les zones inondables, la cartographie hydrogéomorphologique émerge. Cette approche naturaliste, développée durant les années 1980, se propagea dans une large partie du Sud de la France. Aujourd'hui, la cartographie hydrogéomorphologique est une méthode reconnue pour sa fiabilité, mais elle stagne en termes d'applications et de développement dans de nouveaux territoires. Afin d'améliorer la connaissance de la prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique dans un cadre réglementaire, une analyse de 282 PPRI a été menée. Cette analyse a permis de dégager les modalités de prise en compte de la cartographie hydrogéomorphologique, mais également d'émettre des hypothèses sur les raisons de leur développement. La réalisation de MNZI (Modèle Numériques de Zones Inondables) sur des cours d'eau français et canadiens, a permis de mettre en avant l'adaptabilité de la cartographie hydrogéomorphologique à des contextes physiques différents, mais aussi d'apporter une réponse à la demande de prise en compte de cartographie de crue extrême de la Directive Inondation. L'évolution cartographique proposée dans ce travail comprend une réflexion autour de la légende des AZI, mais aussi sur le concept de cartographie positive. A travers les aspects cartographiques, réglementaires et géomorphologiques abordés, nous finissons par proposer un modèle de développement de la cartographie hydrogéomorphologique.

Mots clés : Inondation, Risque, PPR, Géomorphologie, Crue extrême, LiDAR, France, Québec

Hydrogeomorphological approach: practices, valuations and development of a floodplain mapping method

Abstract:

Flood hazard knowledge is increasingly becoming critical in flood risk management. The hydrogeomorphological mapping emerged in France, aiming to provide authorities with floodplain cartography. That naturalistic approach, developed in the 1980 decade, spread through the South of France. Today, the hydrogeomorphological mapping is widely recognized for its reliability. Though, it stagnates in terms of applications and development in new territories. The analysis of 282 PPRI (Flood Risk Prevention Plans) was performed in order to assess the extent of usage of hydrogeomorphological mapping in flood risk regulatory framework. That analysis highlighted how hydrogeomorphological mapping is used in the French flood risk management. NMFP (Numerical Model of Floodplain) production on French and Canadian rivers showed how the hydrogeomorphological interpretation could be adaptable to different physical contexts. It also answers to the European "Floods Directive" that asks for an extreme flood mapping. The cartographic evolution proposed in this research particularly includes AZI (Floodplains maps) legend simplification. It also makes proposals on a flood risk "positive mapping" of. Through cartographic, regulatory and geomorphologic aspects, this research finally proposes a development model applicable to hydrogeomorphological mapping.

Key words: Flood, Risk, PPR, Geomorphology, Extreme flood, LiDAR, France, Quebec