



HAL
open science

Satellite image analysis for three-dimensionnal flood hazard characterisation and hydraulic modelling support.

Renaud Hostache

► **To cite this version:**

Renaud Hostache. Satellite image analysis for three-dimensionnal flood hazard characterisation and hydraulic modelling support.. Sciences of the Universe [physics]. ENGREF (AgroParisTech), 2006. English. NNT: . pastel-00002016

HAL Id: pastel-00002016

<https://pastel.hal.science/pastel-00002016>

Submitted on 4 May 2007

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.

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'Unité Mixte de Recherche « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale » (UMR TETIS) Cemagref/ENGREF/CIRAD, à Montpellier. Ils ont été financé pour moitié par le Cemagref, l'autre moitié provenant d'un projet R&T du CNES.

Je souhaite tout d'abord remercier tout particulièrement mon directeur de thèse et encadrant Christian Puech, pour m'avoir permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions, mais aussi pour ses riches conseils et enseignements scientifiques, pour sa disponibilité permanente en particulier lors la relecture fastidieuse du mémoire, pour sa franchise à toute épreuve et pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir.

Je souhaite également remercier Sylvain Labbé et Pascal Kosuth, directeurs successifs de l'UMR TETIS (précédemment UMR3S), pour m'avoir accueillis au sein de leur laboratoire.

J'exprime ma reconnaissance envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mes travaux sous la présidence d'André Paquier. Remerciement spécial à Denis Dartus et Laurent Polidori pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. Lucien Hoffmann, Jérôme Monnier et Hervé Yésou, ont également accepté de faire partie de mon jury et je leur en suis très reconnaissant.

Je remercie particulièrement Lucien Hoffmann pour m'avoir accueilli pendant deux mois au CRP Gabriel Lippmann (Luxembourg) au cours de ma thèse et de m'avoir ainsi permis de travailler en collaboration en particulier avec Patrick Matgen et Guy Schummann sans lesquels la modélisation hydraulique aurait été beaucoup plus difficile à réaliser.

Je remercie également, Gordana Vujanic (Radarsat International), André Stenger et Thierry Devillard SNNE, Michel Retter, Jean-louis Marchal-Dombra et Philippe Gastaud (DIREN lorraine et Meuse), Peter Höerter des services hydrométriques Allemand, Christine Joste de l'EPAMA pour les données et les informations qu'ils ont pu me fournir.

Un merci à Damien Raclot, Jean Michel Martinez, Jean baptiste Faure, Michel Gay, Vincent Guinot pour leurs conseils avisés.

Un grand merci à tout ce que j'ai côtoyé quotidiennement au sein de la Maison de la télédétection, en particulier, à Carole et Denis pour leur patience et leur constance lors des instants de décompression, à Isa pour son énergie inépuisable, à Bruno pour son humour à toute épreuve, mais aussi à Sophie, Nicolas(s), Andres, Céline, Hector, Eloi, Yolanda, Christophe le savoyard, Guillaume et tous les autres.

Enfin, merci à ma mère et ma pacsette Audrey pour leur soutien et leurs encouragements, tout particulièrement lors du stress pré-soutenance.

Résumé

Les images satellitaires (radar ou optiques) de rivières en crue sont riches d'informations qui s'avèrent très pertinentes dans un contexte de gestion opérationnelle des inondations. Par exemple, dans le cadre de la « Charte Espace et Catastrophes Majeures », des cartes d'inondations extraites d'images satellitaires sont traitées et livrées, dans les quelques heures qui suivent leur réception, aux organismes de secours et d'intervention habilités afin de faciliter leurs opérations. Cependant, cette exploitation des images satellitaires d'inondations est restreinte à une caractérisation géométrique en deux dimensions (contours et surface) de la zone inondée sans considération pour les phénomènes hydrauliques mis en jeu. En conséquence, cette exploitation des images satellitaires pourrait être améliorée par une caractérisation de l'inondation en trois dimensions fine et cohérente avec les phénomènes physiques et une intégration des caractéristiques spatiales issues de l'imagerie satellitaire dans une démarche de modélisation hydraulique afin de caractériser la crue dynamiquement.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est d'étendre les méthodes d'analyse des images satellitaires au-delà de la cartographie d'inondation afin de montrer le potentiel de ces images dans une démarche de caractérisation spatio-temporelle de la crue. Pour répondre à cet objectif, les travaux de thèse ont été orientés suivant deux problématiques de recherche. La première problématique concerne la caractérisation d'inondation en trois dimensions fine et cohérente. Celle-ci a été basée sur 1) l'extraction de caractéristiques spatiales de crue à partir d'images satellitaires et l'analyse de leur pertinence locale d'un point de vue hydraulique, 2) le croisement des informations pertinentes issues des images avec un Modèle Numérique de Terrain fin (MNT), sous contrainte de cohérence spatiale vis à vis d'un écoulement hydraulique à travers une plaine. La seconde problématique s'est attachée au calage de modèles hydrauliques grâce aux caractéristiques spatiales extraites de l'imagerie satellitaire. Elle vise la réduction du phénomène d'équifinalité et le développement de modèles hydrauliques mieux contraints et par conséquent plus fiables en prévision.

Les retombées de ces travaux impliquent en particulier un gain potentiel en terme de gestion opérationnelle de crue. En effet, l'utilisation combinée de modèles hydrauliques mieux contraints et de caractéristiques spatiales issues d'images satellitaires offre des possibilités de prévision de l'évolution temporelle de la crue au-delà de la date d'acquisition d'une image. La méthodologie complète de caractérisation spatio-temporelle d'inondation à partir d'images satellitaires a été appliquée à un tronçon de 28 km de la Moselle entre Thionville (France) et Perl (Allemagne), avec une image RADARSAT-1 (taille du pixel 12,5cm) de la crue de février 1997. Sur ce site d'étude, des estimations de niveaux d'eau ont pu être obtenues avec une demi-incertitude de 38 cm pour l'image RADARSAT-1 couplée à un MNT issue de photogrammétrie sur photographies aériennes au 8000^{ème}. Par ailleurs, des travaux de validation avec une image ENVISAT (taille du pixel 12,5 m) d'une crue de l'Alzette (Grand-Duché du Luxembourg) ont permis de calculer une erreur quadratique moyenne de 13 cm sur les estimations de niveaux d'eau.

Mots clés : Télédétection spatiale, inondation, cohérence hydraulique, Modèle Numérique de Terrain (MNT), modélisation hydraulique, équifinalité, simulations Monte-Carlo.

Abstract

Satellite images (optic or radar) of river inundations reveal themselves to be very relevant to flood operational management. For example, the "Space and Major Disaster Charter" states to provide flood maps extracted from satellite images few hours after receiving images. These maps are then given to competent rescue services in order to make their operations easier. However, this exploitation of satellite images of floods is restricted to a 2-dimensional (2D) geometrical characterization of flooded area and doesn't take into account hydraulic laws. As a consequence, this exploitation could be really emphasized by a fine and hydraulic-coherent 3-dimensional (3D) characterization of floods and an integration of the spatial characteristics resulting from the satellite imagery in hydraulic modeling in order to study and manage floods using dynamic knowledge.

In this context, the PhD aims at deploying methods of satellite images analysis beyond 2D flood cartography in order to show the potential of these images in a process for flood space-time characterization. To meet this aim, the Thesis has been tackled through two research issues. The first issue relates to the fine and hydraulic-coherent 3D flood characterization. This characterization has been based on a two step approach: i) analysis of image local relevance for spatial characterization of flood, ii) fusion between relevant information resulting from these images with a fine Digital Elevation Model (DEM) and constraining the spatial characteristics extracted from images by concepts of coherence with respect to a hydraulic flow through a plain. The second issue focuses on analyzing accuracy and validity of hydraulic models thanks to the spatial characteristics extracted from satellite imagery. This is done in a framework of equifinality reduction in hydraulic model parameterization. An objective of this step is to allow development of better-constrained and thus hydraulic models more reliable for forecasting.

The results of the Thesis imply especially great potential benefits for flood operational management. Indeed, the combined use of better constrained hydraulic models and spatial characteristics resulting from satellite images offers opportunities to forecast the flood temporal evolution after the acquisition of a satellite image.

The full methodology for space-time characterization of flood thanks to satellite images has been applied to a section of 28 km of the Mosel River between Thionville (France) and Perl (Germany), thanks to a RADARSAT (pixel spacing 12,5cm) image of the February 1997 flood event. The estimates of water levels have been obtained with an half-uncertainty of 40 cm for the RADARSAT-1 image coupled to a DEM resulting from photogrammetry on air photographs (scale 1/8000). In addition, validation works with an ENVISAT image (pixel spacing 12,5 m) of an Alzette river flood (Grand-Duchy of Luxembourg) and a LiDAR DEM allowed us to calculate a Root Mean Square Error of 13 cm on the estimates of water levels.

Key words: satellite remote sensing, flood, hydraulic coherence, Digital Elevation Model (DEM), hydraulic modelling, equifinality, Monte-Carlo simulations.

Table des matières

Introduction générale	1
Partie I. Aléa inondation, modélisation hydraulique et télédétection	7
Introduction	9
Chapitre 1. De l'aléa inondation à sa modélisation hydraulique	11
1.1 Les inondations : ampleur, définitions et notion de risque	11
1.2 La gestion et la modélisation hydraulique des inondations	16
1.3 Données disponibles et données attendues dans la gestion et la modélisation hydraulique des inondations	26
Chapitre 2. La télédétection par satellite	35
2.1 Télédétection satellitaire optique passive	35
2.2 Télédétection satellitaire radar à synthèse d'ouverture	41
Chapitre 3. Apports des images satellitaires pour la gestion des inondations	57
3.1 Caractérisation spatiale en deux dimensions d'inondations à partir d'images satellitaires	58
3.2 Estimation de niveaux d'eau et de débit par télédétection	66
3.3 Utilisation des images satellitaires pour l'aide à la modélisation hydraulique	71
Conclusion	75
Partie II. Méthodologies	77
Introduction	79
Chapitre 4. Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.	81
4.1 Pré-traitements des images satellitaires radar	82
4.2 Classification « eau-non eau » sur les images	84
4.3 Extraction d'une carte d'inondation certaine	86
4.4 Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau	89
4.5 Conclusion	92
Chapitre 5. Estimation des niveaux d'eau	95
5.1 Estimation primaire des niveaux d'eau par croisement entre les segments informatifs et un MNT à haute résolution spatiale	96
5.2 Construction d'une hiérarchie hydraulique dans la plaine d'inondation	96
5.3 Mise en cohérence hydraulique	102
5.4 Conclusion	108
Chapitre 6. Intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique.	111
6.1 Introduction	111
6.2 Modèle hydraulique, calage et donnée image	112
6.3 Simulations Monte-Carlo et méthode GLUE	113
6.4 Évaluation des simulations Monte-Carlo	114
6.5 Conclusion	121

Partie III. Application de la méthode, résultats et discussions	123
Introduction	125
Chapitre 7. Sites d'études et constitution de bases de données	127
7.1 La Moselle entre Thionville et la frontière franco-germano-luxembourgeoise	127
7.2 Les sites d'étude complémentaires	133
Chapitre 8. Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.	143
8.1 Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.	144
8.2 Estimation des niveaux d'eau	151
8.3 Intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique	155
Chapitre 9. Qualité des résultats de la méthode, discussions et perspectives	173
9.1 Qualité des résultats et des méthodes	174
9.2 Bilan et perspectives	183
Conclusion générale	193
Références bibliographiques	199
Table des illustrations	211
Liste des tableaux	216
Annexes : Documents et travaux complémentaires	1
Annexe 1. Pluviométrie de février 1997 en lorraine	3
Annexe 2. Barrages de Koenigsmacker et Apach	4
A2.1 Barrage de Koenigsmacker	4
A2.2 Barrage d'Apach	9
Annexe 3. Cartes d'inondations obtenues à partir d'images ERS-1 pour le site d'étude de la Meuse.	13
Annexe 4. Résultats complémentaires des évaluations des simulations Monte-Carlo pour le site d'étude de la Moselle.	21
Annexe 5. Ordres de grandeur des coefficients de frottement de Strickler obtenus par M. Pradé.	25
Annexe 6. Carte d'inondation obtenue à partir d'une image SPOT-4 pour le site d'étude de l'Hérault.	26

Introduction générale

Les inondations et la gestion du risque

Dans le monde et en particulier en France, les inondations sont au rang de premier risque naturel (Berz, 2000). Dans les dernières décennies, les dommages engendrés par les inondations ont été particulièrement importants, avec des coûts imputables moyens annuels estimés à 600 M€ pour la période 1980-2000 (Gresillon, 2004). L'importance de ces dommages est principalement imputable à une urbanisation et une industrialisation passées en plaine d'inondation (Torterotot, 1993), qui ont eu pour conséquence une augmentation de la vulnérabilité des biens et des personnes. Les enjeux très importants liés aux inondations expliquent les efforts qui sont aujourd'hui mis en œuvre pour analyser et comprendre ce phénomène afin de réduire le risque.

Le risque d'inondation est défini comme la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. L'aléa représente le phénomène physique, naturel et non maîtrisable (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable), indépendamment de ses effets potentiels sur l'environnement et les activités humaines. La vulnérabilité exprime le degré de dommage d'un enjeu soumis à un aléa d'intensité et d'occurrence données (Ancey, 2005). La gestion du risque d'inondation doit en conséquence intervenir à la fois au niveau de l'aléa et de la vulnérabilité. Elle doit répondre à deux objectifs principaux qui sont de limiter l'implantation des biens et des personnes au sein des zones fortement exposées et de protéger l'existant. La combinaison de ces deux objectifs est la base d'une démarche cohérente de gestion des inondations. Par exemple, des actions telles que les Plans de Prévention du Risque d'inondation (PPRi) visent à gérer le risque d'inondation en particulier grâce à la maîtrise de l'implantation des biens et des personnes et la caractérisation de la vulnérabilité de l'existant.

Par ailleurs, dans la gestion du risque d'inondation, il est possible de distinguer la prévention, la prévision et la gestion de crise. La prévention, hors contexte de crise, est basée sur l'analyse de crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques. Elle vise à caractériser l'aléa et la vulnérabilité le plus finement possible pour protéger l'existant, informer les populations et limiter l'implantation des biens et des personnes dans les zones fortement exposées, sans contrainte de temps majeure sur la durée des études mise en œuvre. Contrairement à la prévention, la prévision et la gestion de crise correspondent à des actions en état d'urgence. La prévision vise à anticiper la survenue d'une inondation et ses conséquences. La gestion de crise rassemble l'ensemble des moyens mis en œuvre pour protéger, informer, et secourir les populations. Elles nécessitent des outils opérationnels pour des décisions rapides.

La modélisation hydraulique des inondations

Une inondation, au sens d'aléa, est un phénomène naturel très complexe dont l'analyse nécessite des outils performants et élaborés, par exemple les modèles hydrauliques. Ces derniers ont pour principal attrait de simuler numériquement des crues hypothétiques ou réelles ce qui permet de caractériser l'aléa dans l'espace et le temps (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement, débits, durées de submersion...). Ils permettent ainsi de prédire les conséquences potentielles d'une crue et de fournir des informations très utiles aux décideurs, tant en contexte de crise, que pour la prévision et la prévention.

Par ailleurs, comme l'annonce (Vidal, 2005) :

« La simulation numérique ne peut pourtant s'affranchir du monde réel, de la véritable rivière, pour confirmer des hypothèses et évaluer les modèles numériques construits. »

Cela montre un besoin important, dans la modélisation hydraulique, d'observations de crues réelles, sans lesquelles la validité des simulations numériques peut être mise en défaut. Dans la mise en place de modèles hydrauliques une phase de calage est souvent employée (Vidal, 2005). Cette phase est particulièrement délicate, car elle suppose de contraindre le modèle avec des connaissances concernant la crue qui sont la plupart du temps en nombre restreint car difficiles à acquérir sur le terrain. Ce manque de données implique des problèmes d'équifinalité (Beven & Binley, 1992) : plusieurs valeurs de paramètres d'un modèle permettent d'obtenir des résultats de simulations qui coïncident avec des mesures in situ. Pour réduire l'équifinalité, une solution est de mieux contraindre les modèles hydrauliques grâce à des données de calages complémentaires aux mesures in situ (Matgen et al., 2004).

L'observation des inondations grâce à la télédétection spatiale

Dans les années 1970 sont apparues les données spatiales d'observation de la terre. Issues de télédétection par satellite, elles fournissent des visions objectives des inondations, sur de grands territoires. En particulier, les satellites imageurs Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) et optiques passifs permettent d'obtenir des cartes d'inondations (Sanders & Tabuchi, 2000; Sassier et al., 2000; Schmutge, 1987), qui s'avèrent très utiles dans un contexte opérationnel. Par exemple, dans le cadre de la charte « Espace et Catastrophes Majeures » (Disasters Charter[®]), des cartes d'inondations issues d'images satellitaires sont fournies en quelques heures aux utilisateurs habilités afin d'aider les secours et les actions entreprises. Hors contexte de crise, croisées avec d'autres sources de données, par exemple l'occupation du sol, ces cartes d'inondations fournissent des informations concernant les conséquences des inondations et la vulnérabilité.

Cependant, la cartographie d'inondation n'est qu'une exploitation partielle des images satellitaires. En effet, comme le montre certains travaux (Horritt, 2000; Pappenberger et al., 2005a; Smith et al., 1996), les images satellitaires d'inondations sont riches d'informations, au-delà des cartes d'inondations, qui peuvent être très profitables à la gestion des inondations et en particulier à la modélisation hydraulique. Par exemple, une caractérisation tridimensionnelle fine, couplée à une modélisation hydraulique, permettrait d'exploiter de façon plus complète les images satellitaires.

Objectifs de la thèse

Un double constat est à l'origine des travaux de thèse. D'une part, le potentiel des images satellitaires est sous-exploité vis à vis de l'analyse hydraulique des crues. D'autre part, des travaux de recherche sur l'exploitation des images satellitaires existent mais il n'y a pas de méthodologie transférable à l'opérationnel allant de l'image au modèle hydraulique de prévision. En particulier, nous sommes étonnés de constater que les images satellitaires sont à ce jour utilisées en contexte opérationnel uniquement pour la cartographie de l'aléa.

Dans un contexte de sous exploitation des images satellitaires de crues et de manque de données dans le cadre de la modélisation hydraulique, il semble nécessaire d'apporter des méthodes qui permettent de passer de l'image satellitaire de crue à la modélisation hydraulique. Cela permettrait de valoriser les images satellitaires de crues pour une meilleure connaissance l'aléa inondation, au-delà de la seule caractérisation des étendues et limites d'inondation, et d'intégrer ces données dans la modélisation hydraulique pour aider la prévention et la prévision.

En complément d'une caractérisation des étendues inondées, il semble important de valoriser les images satellitaires par une quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau. En particulier, dans le cadre d'un projet R&T - Recherche et Technologie - du CNES, qui a été un des supports de la thèse, une demande a été faite concernant le transfert aux images satellitaires de « l'approche photo » développée par (Raclot, 2003a). Il s'agit d'une méthode d'estimation des niveaux d'eau à partir de photographies aériennes de crue, d'un MNT fin et de concepts de cohérence spatiale empruntés à l'hydraulique.

Dans le cadre de la modélisation hydraulique, les images satellitaires peuvent apporter des données pertinentes et insuffisamment disponibles à ce jour avec des techniques de mesures hydrométriques traditionnelles. Elles peuvent par exemple être exploitées comme données de calage, afin de réduire le phénomène d'équifinalité ou de données d'initialisation des modèles hydrauliques, afin d'aider la prévision. Une perspective qui en découle directement est le développement d'une chaîne de traitement opérationnelle qui assimilerait la donnée satellitaire pour parvenir à la prévision.

La perspective d'une chaîne de traitement opérationnelle est l'élément moteur de la thèse qui est à la base des réflexions menées.

Une chaîne de traitement opérationnelle pourrait utiliser des étendues inondées ou une distribution spatiale des niveaux d'eau extraite d'une image satellitaire comme condition initiale d'un modèle hydraulique afin de calculer le devenir probable d'une inondation. Elle permettrait de prédire des cartes d'inondation, très utiles pour l'aide à la décision et la gestion de crise, dans les quelques heures qui suivent l'acquisition d'une image. Elle nécessiterait en particulier une méthode de décodage d'une image satellitaire en informations d'étendue inondée et/ou de distribution spatiale des niveaux d'eau, un modèle hydraulique préalablement calé et une méthode d'assimilation de la donnée satellitaire dans un modèle hydraulique.

Dans la thèse, nous avons choisi de nous concentrer sur les méthodes de décodage des images satellitaires de crue et l'apport de ces images pour le calage d'un modèle hydraulique.

En conséquence, afin de fournir des avancées méthodologiques permettant de valoriser les images satellitaires et d'aller vers une chaîne de traitement opérationnelle, les questions de recherche auxquelles la thèse souhaite répondre sont les suivantes :

- Comment quantifier la distribution spatiale des niveaux d'eau en plaine inondée à partir d'une image satellitaire de crue ?
- Comment améliorer le calage des modèles hydrauliques grâce aux informations extraites des images satellitaires ?

Pour répondre à ces deux questions de recherche, une approche pluridisciplinaire a été adoptée, à l'intersection entre la télédétection satellitaire, l'analyse spatiale, et la modélisation hydraulique.

Dans le domaine de la télédétection par satellite, les travaux visent à développer une méthode de cartographie orientée vers l'hydraulique qui permette d'extraire d'une image une carte d'inondation limitée aux zones au sein desquelles la présence ou l'absence d'eau est certaine et des limites d'inondation pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau. Ils visent à fournir, à partir d'une image satellitaire de crue, une étendue inondée utile au calage d'un modèle hydraulique et des bordures pertinentes qui permettent, par croisement avec un Modèle Numérique de Terrain, d'obtenir

des estimations des niveaux d'eau sous forme d'intervalles au sein desquels le niveau d'eau réel est inclus.

Dans le domaine de l'analyse spatiale, les travaux visent à calculer des niveaux d'eau en plaine inondée avec des précisions suffisantes vis à vis de celles requises dans le cadre de la modélisation hydraulique. Ils sont basés sur une analyse des bordures pertinentes de l'inondation issues des travaux de télédétection à travers un croisement avec un Modèle Numérique de Terrain fin et des concepts de cohérence spatiale empruntés à l'hydraulique. La thèse souhaite ainsi répondre à la demande d'un projet R&T (CNES) pour le transfert de « l'approche photo » (Raclot, 2003a) aux images satellitaires.

Dans le domaine de la modélisation hydraulique, les travaux visent à montrer l'apport des images satellitaires de crues pour le calage des modèles hydrauliques. L'objectif est de réduire le phénomène d'équifinalité pour permettre le développement de modèles hydrauliques mieux contraints, et par conséquent plus fiables en prévention et en prévision. Pour cela, un calage traditionnel à partir de données hydrométriques *in situ* sera poursuivi grâce aux caractéristiques hydrauliques extraites d'images satellitaires de crue.

Plan du mémoire

Le mémoire est structuré en trois parties

La première partie, bibliographique, vise à replacer la thèse dans son contexte thématique et scientifique. Elle est organisée en trois chapitres. Le premier présente des concepts généraux concernant l'aléa inondation et sa modélisation hydraulique. Le second explique les principes de la télédétection spatiale optique passive et radar à synthèse d'ouverture en application à l'étude des inondations. Le troisième dresse un état de l'art des acquis en terme d'étude des inondations à partir des techniques de télédétection couplées, le cas échéant, à la modélisation hydraulique.

La deuxième partie expose le cœur des travaux de thèse. Elle explique les méthodes développées suivant trois chapitres. Le premier présente une méthode de cartographie d'inondation - étendues et limites - à partir d'images satellitaires, orientée vers l'hydraulique. Le second présente une méthode d'estimation des niveaux d'eau par croisement de limites d'inondation avec un Modèle Numérique de Terrain sous contraintes de cohérence spatiale vis à vis de lois régissant un écoulement d'inondation. Le troisième présente une méthode d'intégration des étendues inondées et des niveaux d'eau obtenus à partir d'images satellitaires de crue dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique.

La troisième et dernière partie est consacrée à l'application des méthodes sur des cas d'études réels et à la discussion. Elle est structurée en trois chapitres. Le premier présente les sites d'études, leurs caractéristiques hydrologiques et hydrauliques ainsi que les bases de données qui ont pu y être recueillies. Le second est consacré à la présentation des résultats obtenus sur le site d'étude Moselle (France). Le troisième est destiné à la discussion concernant la qualité des résultats obtenus, les apports scientifiques et techniques de la thèse et ses perspectives.

Partie I.

**Aléa inondation, modélisation
hydraulique et télédétection**

Sommaire de la première partie

Introduction	9
Chapitre 1. De l'aléa inondation à sa modélisation hydraulique	11
Chapitre 2. La télédétection par satellite	35
Chapitre 3. Apports des images satellitaires pour la gestion des inondations	57
Conclusion	75

Introduction

La compréhension et la gestion des inondations sont des problématiques récurrentes dans les sociétés actuelles. Pour replacer les travaux de thèse au sein de ces préoccupations, la première partie du document explique et présente des notions fondamentales concernant les inondations et des outils actuels qui permettent de mieux comprendre et gérer ce phénomène naturel.

Un outil courant dans la gestion des inondations est la modélisation numérique qui est apparue avec les premiers ordinateurs et dont le potentiel ne cesse de s'accroître grâce à l'augmentation constante des capacités des calculateurs informatiques. Par ailleurs, dans les années 1970 sont apparues les données d'observation de la Terre issues de télédétection spatiale qui fournissent des visions objectives et pertinentes des inondations. La télédétection spatiale offre aujourd'hui des opportunités considérables par la compréhension et la gestion des inondations.

Dans ce contexte, la première partie du document de thèse dresse un état de l'art des acquis méthodologiques pour la compréhension et la gestion des inondations grâce à la modélisation hydraulique et les techniques de télédétection par satellite. Dans cette partie, l'accent est mis sur la gestion opérationnelle des inondations dans laquelle la thèse souhaite apporter des outils analytiques et méthodologiques novateurs et pertinents.

La première partie est organisée en trois chapitres. Le premier présente les concepts généraux concernant l'aléa inondation et sa modélisation hydraulique. Le second explique les principes de la télédétection spatiale optique passive et Radar à Synthèse d'Ouverture en application à l'étude des inondations. Le troisième dresse un état de l'art des acquis en terme d'étude des inondations à partir des techniques de télédétection couplées à la modélisation hydraulique.

Chapitre 1.

De l'aléa inondation à sa modélisation hydraulique

Sommaire

1.1 Les inondations : ampleur, définitions et notion de risque	11
1.1.1 Les inondations dans le monde et en France	11
1.1.2 Définition et genèse du phénomène d'inondation	12
1.1.3 La plaine alluviale	13
1.1.4 Risque : aléa et vulnérabilité	14
1.2 La gestion et la modélisation hydraulique des inondations	16
1.2.1 La gestion des inondations	17
1.2.2 La modélisation hydraulique des inondations	19
1.3 Données disponibles et données attendues dans la gestion et la modélisation hydraulique des inondations	26
1.3.1 Les données hydrométriques	26
1.3.2 Les données topographiques	28

Ce premier chapitre a deux objectifs principaux. Il vise à replacer la thèse dans le contexte de la gestion des inondations et introduire les problématiques liées à la modélisation hydraulique des crues. Il présente des notions générales concernant la compréhension, la gestion et la modélisation hydraulique des inondations, ainsi que les données disponibles et attendues dans le cadre de la gestion et de la modélisation hydraulique des inondations.

1.1 Les inondations : ampleur, définitions et notion de risque

1.1.1 Les inondations dans le monde et en France

Dans le monde, les inondations sont au rang de premier risque naturel et représentent en France plus de la moitié des risques naturels avec des enjeux humains (Berz, 2000). Une commune française sur trois est concernée par les inondations (dont 300 grandes agglomérations). Pour 160 000 km de cours d'eau, une surface de 22 000 km² est reconnue particulièrement inondable : deux millions de riverains sont concernés. Les dégâts causés par les inondations représentent environ 80 % du coût des dommages imputables aux risques naturels, soit en moyenne 600 M€ - coût annuel calculé sur la période 1980-2000 (Gresillon, 2004). Pour illustrer l'importance et les enjeux du phénomène d'inondation en France, la Figure 1.1 présente les grandes crues historiques et le nombre d'inondations survenues, par département, entre 1982 et décembre 2001 (hors inondations liées à la tempête de 1999), et la Figure 1.2 présente une photographie aérienne de Koeking pendant la crue de la Moselle en 1983. Cette ampleur est à l'origine des efforts mis en oeuvre actuellement pour étudier et comprendre ce phénomène.

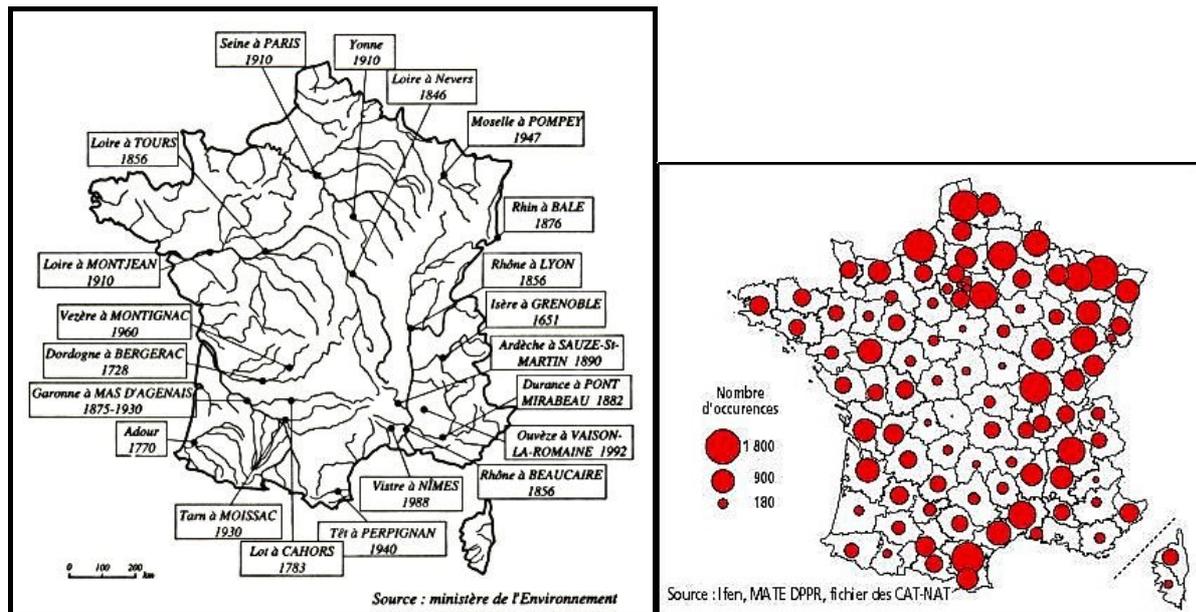


Figure 1.1 : Principales crues historiques en France (à gauche) et nombre d'inondations, par département, entre 1982 et 2001 (à droite), hors phénomènes liés à la tempête de décembre 1999 .



Figure 1.2 : Photographie aérienne de Koeking (Moselle, France) le 28 mai 1983 (DIREN Lorraine®).

1.1.2 Définition et genèse du phénomène d'inondation

D'après la définition donnée dans le dossier d'information « Inondation » (MEDD-PRIM[®]) :
 « L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau ».

D'après le même dossier :

« Au sens large, les inondations comprennent les débordements d'un cours d'eau, les remontées de nappes, les ruissellements résultant de fortes pluies d'orages, les inondations par rupture d'ouvrages de protection, les inondations estuariennes résultant de la conjonction de fortes marées, de situations dépressionnaires et de la crue des fleuves ».

Dans la thèse, seules les inondations au sens de débordements de cours d'eau en plaine alluviale seront étudiées. Par conséquent, dans la suite, le terme **inondation** désignera **les débordements de cours d'eau en plaine alluviale**.

L'élément majeur à l'origine d'une inondation de plaine est la chute de précipitations importantes sur le bassin versant (Figure 1.3). D'après le site Internet du Regroupement des Associations Pour la Protection de l'Environnement des Lacs et des cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la rivière Saint-François (RAPPEL®), le bassin versant représente :

« l'ensemble d'un territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents. Son contour est délimité par la ligne de partage des eaux qui passe par les différents sommets et qui détermine la direction de l'écoulement des eaux de surface. En aval, sa limite est définie par son exutoire ».

De façon schématique, au cours de fortes précipitations, une partie de l'eau s'infiltré dans le sol, le reste ruisselle sur les versants et est ainsi acheminé vers les cours d'eau (Figure 1.3). Lorsqu'une quantité d'eau très importante parvient au cours d'eau celui-ci déborde de son lit « habituel » (ou lit mineur) et donne ainsi naissance au phénomène d'inondation.

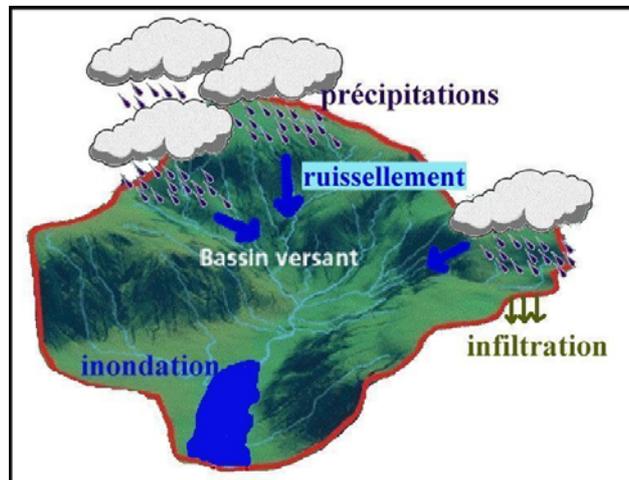


Figure 1.3 : La genèse du phénomène d'inondation (débordement de cours d'eau).

1.1.3 La plaine alluviale

Le terme « plaine alluviale » désigne usuellement les zones de fond de vallée, à faible dénivelé, constituées par des alluvions déposées lors des crues du cours d'eau. En terme d'écoulement, la plaine alluviale est souvent décomposée en trois zones : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur de la rivière (Figure 1.4). Le lit mineur correspond à la zone d'écoulement du cours d'eau hors débordement. Le lit moyen correspond à la zone d'écoulement pour des crues d'occurrences relativement faibles. Le lit majeur contient toutes les zones de la plaine dans lesquelles le cours d'eau est susceptible de s'écouler et de déborder.

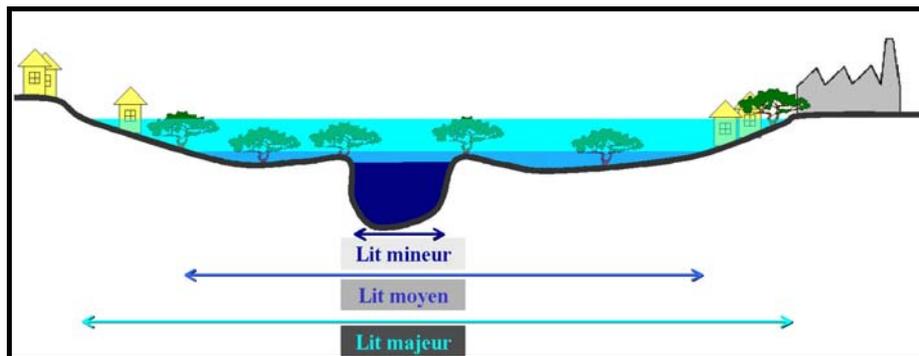


Figure 1.4 : Représentation schématique des lits mineur, moyen et majeur en plaine alluviale.

1.1.4 Risque : aléa et vulnérabilité

La notion de risque est communément définie comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité (Ancey, 2005; Gilard & Gendreau, 1998; Oberlin et al., 1993). En effet, d'après (Torterotot, 1993) :

« Il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas sans élément vulnérable exposé ».

L'aléa

L'aléa est un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité données (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable). Il peut être caractérisé suivant deux composantes, l'une fréquentielle (occurrence), l'autre spatio-temporelle (intensité).

Composante fréquentielle de l'aléa

La composante fréquentielle de l'aléa exprime la probabilité d'exposition d'un lieu à une crue d'occurrence donnée. L'occurrence d'une crue est la plupart du temps caractérisée d'un point de vue statistique par un temps de retour T . Le temps de retour est défini comme l'inverse mathématique de la probabilité F qu'à une crue d'amplitude donnée de se produire une année donnée :

$$T = \frac{1}{F} \quad (1.1)$$

Une attention particulière doit être accordée à considérer le temps de retour d'une crue d'un point de vue statistique. En effet, un temps de retour d'une crue de 100 ans ne signifie pas que cette crue se produit tous les 100 ans, mais que celle-ci a une probabilité de 1% de se produire une année donnée.

Composante spatio-temporelle de l'aléa

La composante spatio-temporelle de l'aléa décrit l'intensité du phénomène. D'un point de vue spatial l'aléa peut en particulier être caractérisé par les surfaces inondées, les hauteurs d'eau, les durées de submersion, les vitesses et les débits dans la plaine. Un descripteur courant de l'intensité de l'aléa est le débit de pointe. Celui-ci correspond au débit maximal instantané transitant dans la plaine à l'apogée de la crue. Il est variable selon la position dans la plaine d'inondation, ce qui induit une composante spatiale forte de l'aléa. Par ailleurs, pour caractériser l'aléa, le temps de concentration est fréquemment utilisé. Il est défini théoriquement pour un bassin versant comme le temps nécessaire à une goutte d'eau tombée au point du bassin le plus éloigné de l'exutoire pour y parvenir (ROCHE,

1963). Il est en particulier fonction de la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols, et par conséquent de l'occupation du sol et des caractéristiques morphologiques et climatiques du bassin versant. En général, pour des bassins versants de mêmes caractéristiques morphologiques et climatologiques, un temps de concentration plus court est associé à un débit de pointe plus élevé.

D'un point de vue spatio-temporel, l'aléa inondation est souvent caractérisé en un lieu donné par une probabilité d'occurrence (de retour) à laquelle est associé un débit de pointe. L'estimation du temps de retour d'une crue résulte de statistiques historiques sur les événements observés dans la plaine d'inondation considérée. Par conséquent, plus les séries de données temporelles sur les inondations sont fournies, plus l'estimation de la relation temps de retour/débit de pointe est fiable, sous condition d'une dynamique temporelle de la morphologie et de l'occupation du sol du bassin versant considéré faible. Par ailleurs, pour estimer les débits de pointes de crues de temps de retour non observé, les méthodes d'analyse déterministes, extrapolent les relations temps de retour/débit de pointe. Ces extrapolations pour des événements de temps de retour important sont d'autant plus fiables que les séries de mesures historiques sont longues.

La vulnérabilité

La vulnérabilité exprime l'importance des dommages potentiellement subits par des enjeux soumis à un aléa d'intensité donnée. La notion d'enjeu intègre les personnes, les biens et les activités susceptibles d'être affectés par l'aléa.

Les conséquences de l'aléa sur des enjeux peuvent être bénéfiques (recharge de nappes phréatiques, alimentation des terres agricoles en limon...) ou néfastes (destruction d'habitats, mort de personnes, coupures de voies de communication...).

La notion de vulnérabilité concerne les conséquences néfastes, c'est à dire les dommages. Ces derniers peuvent être de plusieurs natures (Torterotot, 1993) :

- pertes en vies humaines et effets sur la santé des personnes,
- dégâts matériels,
- impacts liés aux difficultés de fonctionnement, d'échange, et de communication (qualifiés d'impacts indirects).

Par exemple, une vulnérabilité maximale, pour un aléa d'intensité I , signifie la ruine de l'aménagement ou la mort des personnes concernées si une crue d'intensité supérieure ou égale à I se produit (Ancéy, 2005) ce qui implique que la vulnérabilité est étroitement liée à l'intensité du phénomène.

L'évaluation des dommages occasionnés par une inondation est particulièrement complexe (Manche, 2000) car ils peuvent être directs ou indirects. Les impacts indirects sont les plus délicats à appréhender et chiffrer car ils dépendent de la sensibilité des secteurs touchés et sont parfois intangibles, c'est à dire qu'il n'existe pas d'unité de mesure, en particulier monétaire, permettant de les comparer et de les classer. Pour contourner ce problème, on suppose fréquemment que dommages indirects et tangibles directs sont proportionnels, de sorte que l'évaluation des dommages tangibles directs soit suffisantes.

Le risque d'inondation

Le risque représente la probabilité de dommages matériels et économiques, de blessures, et/ou de décès liée à l'occurrence d'un aléa naturel (Ancey, 2005). Il intègre l'aléa et la vulnérabilité, c'est à dire qu'il dépend d'un phénomène naturel obéissant à une loi de probabilité, et des enjeux exposés en lien avec les ressources disponibles pour y faire face (Torterotot, 1993).

La caractérisation du risque est une problématique délicate. Pour aboutir à une quantification objective du risque, la méthode Inondabilité (Gilard & Gendreau, 1998) vise à mesurer dans la même unité et à comparer les deux facteurs indépendants que sont l'aléa et la vulnérabilité. Sa mise en oeuvre sur un bassin versant consiste en une modélisation hydrologique (Débit-durée-Fréquence), couplée à une modélisation hydraulique et de l'occupation du sol pour aboutir à une représentation cartographique du risque. Par ailleurs, la quantification du risque est estimée à l'aide d'une différence (Risque = Δ (aléa, vulnérabilité)) contrairement aux approches traditionnelles qui privilégient souvent un produit (Risque = Coût \times probabilité), permettant ainsi la définition d'un risque acceptable (Δ négatif).

Une augmentation du risque d'inondation dans une plaine alluviale peut être due à un accroissement des enjeux ou une augmentation de l'aléa. Par exemple, l'urbanisation est fréquemment responsable d'une croissance du risque pour deux raisons :

- La construction d'habitations en plaine alluviale accroît les enjeux.
- L'implantation de bâtiments, parkings, de routes... imperméabilise une partie du bassin versant et entraîne un accroissement du ruissellement, une augmentation du débit de pointe et une réduction du temps de concentration dont il résulte une augmentation de l'aléa et une réduction du temps disponible pour faire face (Figure 1.5).

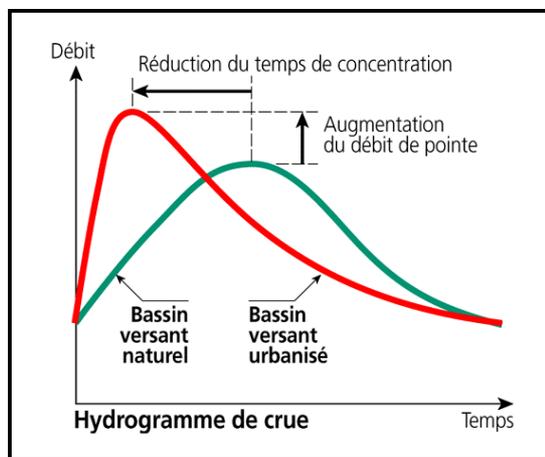


Figure 1.5 : Illustration de l'augmentation du débit de pointe de crue due à l'urbanisation des bassins versants (MEDD-PRIM®).

1.2 La gestion et la modélisation hydraulique des inondations

Dans le cadre de la gestion des inondations, la modélisation hydraulique est devenue un outil courant (Horritt & Bates, 2002). Elle vise à prédire numériquement l'évolution spatio-temporelle des

caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue (débit, vitesses, hauteur d'eau, surfaces inondées..). Les tenants et aboutissants de cette modélisation seront exposés en détail dans le paragraphe 1.2.2. En préalable, le paragraphe 1.2.1, aborde les motivations et les modalités d'utilisation de ces modèles.

1.2.1 La gestion des inondations

Pour présenter la gestion des inondations, nous avons choisi de structurer l'exposé suivant deux aspects complémentaires qui se différencient par le niveau d'urgence des moyens à mettre en oeuvre : 1) La prévention et le retour d'expérience, 2) la prévision et la gestion de crise.

1.2.1.1 *La prévention et le retour d'expérience : hors contexte de crise*

La prévention et le retour d'expérience sont des aspects de la gestion des inondations hors contexte de crise. Ils sont basés sur l'analyse de crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques et de limiter le risque.

La prévention face au risque d'inondation

La prévention intervient au préalable d'une crise. Elle vise à gérer et réduire le risque (aléa et vulnérabilité) d'inondation. Elle inclut d'une part l'information des populations concernant leur vulnérabilité aux inondations et les démarches à suivre en cas de crise, et d'autre part la mise en place de moyens de protection et l'organisation des secours. En France, la loi de février 1995 sur le renforcement de la protection de l'environnement a instauré le Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR), dont le Plan de Prévention du Risque d'inondation (PPRi) fait partie. Le PPRi a pour objet de (MEDD-PRIM[®]) :

« capitaliser les connaissances locales du risque d'inondation afin de délimiter les zones vulnérables, prescrire des conduites d'urbanisation et de gestion des zones à risque et prendre des mesures pour la prévention et la protection des constructions existantes ».

En particulier, le PPRi limite et impose des contraintes fortes pour les nouvelles constructions dans les zones très exposées. Il définit des règles concernant l'utilisation du sol et la gestion de l'espace en fonction de la sensibilité locale au risque d'inondation.

Dans une démarche de prévention face au risque d'inondation, la priorité est donnée à prédire de façon précise l'ampleur et les conséquences de crues potentielles, sans contraintes trop importantes sur la durée des études mises en œuvre. En conséquence, les modèles hydrauliques utilisés dans le cadre de la prévention des inondations ont pour objectif de reproduire le plus précisément possible les écoulements dans la plaine, même si leur mise en place et leurs temps de calcul peuvent s'avérer longs.

Le retour d'expérience

Le retour d'expérience, ultérieur à la crise, vise à tirer des enseignements des crues survenues par le passé afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et d'aider la gestion des crues à venir. Il est à la base de la culture du risque (MEDD). Dans une démarche d'analyse par retour d'expérience, les données et connaissances disponibles sur les crues passées (e.g. : mesures hydrométriques, laisses de crue, surfaces inondées extraites d'images satellitaires ou de photographies aériennes...) sont

analysées afin de comprendre et éventuellement modéliser les phénomènes physiques. Le retour d'expérience est en particulier mis en oeuvre pour une analyse de la vulnérabilité (Yésou et al., 2000) et le découpage spatial des plaines d'inondation en terme d'exposition au risque d'inondation (PPRi). En conséquence, le retour d'expérience s'avère très utile pour l'amélioration de la prévention des crues.

1.2.1.2 La Prévision et la gestion de crise : en contexte de crise

Contrairement à la prévention et au retour d'expérience, la prévision et la gestion de crise correspondent à des actions en état d'urgence.

La prévision, en préalable direct d'une crise éventuelle

La prévision vise à anticiper la survenue d'une crue et ses conséquences afin d'alerter les populations et de mettre en place des secours plus efficaces. D'un point de vue historique, en France, l'état a mis en place depuis le milieu du 19^{ème} siècle une annonce des crues sur les principaux cours d'eau. En 2002, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) a engagé la réforme de l'annonce des crues, de façon à améliorer le service rendu au public et aux maires de plus de 6000 communes inondables par les grands cours d'eau. Cela a entraîné en particulier la création du SCHAPI (Service Central d'Hydro-météorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations) à Toulouse, et de 22 Services de Prévision des Crues (SPC) en remplacement des 52 Services d'Annonce des Crues (SAC) préexistants. Dans ce cadre, depuis juillet 2006, un système d'information opérationnel en continu a été mis en place : la procédure de vigilance crues¹ (MEDD).

Contrairement à la prévention, la prévision est fortement contrainte par le temps. Elle s'intéresse à des inondations réelles, en cours de formation, qui risquent d'atteindre des zones vulnérables. En conséquence, la prévision s'applique aux états d'urgence, qui impliquent une réaction quasiment instantanée afin de fournir des informations très rapidement, quitte à obtenir des précisions moindres que dans le cas de la prévention. Les modèles hydrauliques utilisés pour la prévision doivent par conséquent être simples à mettre en oeuvre avec des temps de calcul très courts.

La gestion de crise

La gestion de crise rassemble toutes les actions qui sont entreprises en période de crue afin de secourir et protéger les populations et les biens. En France, elle est assurée par les services de sécurité civile. Les opérations de secours d'urgence, de protection et d'information sont assurées par les Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS). La mise en place d'itinéraires d'accès et de secours est à la charge des Directions Régionales de l'Équipement (DRE). Le dernier maillon de la chaîne de la gestion de crise est représenté par les maires des communes. Ces derniers engagent leurs responsabilités civiles, pénales et administratives pour la communication des risques, la mise en oeuvre de mesures de précaution et de sauvegarde des biens et des personnes.

Dans le cadre de la gestion de crise, les étendues inondées et les voies de circulation coupées sont des informations très utiles pour l'aide aux organismes d'intervention et de secours. Ces informations sont,

¹ <http://www.vigicrues.ecologie.gouv.fr/>

comme on le verra par la suite, accessibles à partir d'images satellitaires ou de photographies aériennes de crue.

Pour synthétiser le paragraphe 1.2.1, la Figure 1.6 présente les différents aspects de la gestion des inondations qui, combinés, sont la base d'une démarche cohérente (Raclot, 2003a).

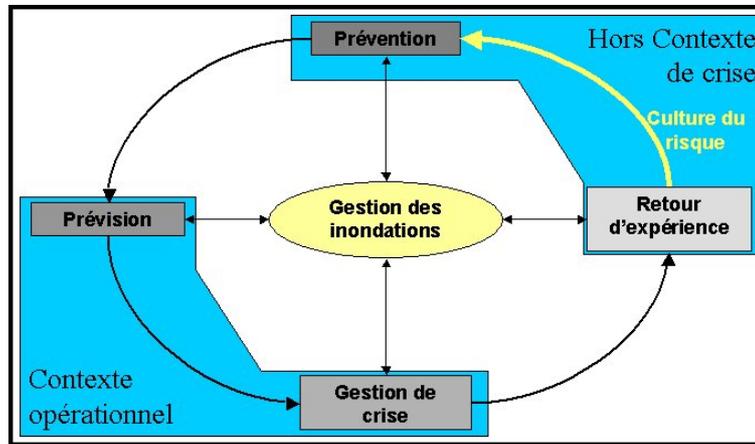


Figure 1.6 : Champs d'intervention dans la gestion des inondations

1.2.2 La modélisation hydraulique des inondations

Dans la thèse nous ne nous intéresserons qu'aux modèles hydrauliques « numériques » (codes de calculs informatiques), en opposition aux modèles réduits (maquettes).

Comme il a été annoncé dans le paragraphe précédent, la modélisation hydraulique est un outil couramment employé pour la compréhension, l'analyse et la gestion des inondations. En particulier elle est d'un grand intérêt pédagogique (création de cartes d'inondations pour l'information des populations : prévention), prospectif (outil d'aide à la décision : protection et prévention) (Kreis, 2004), mais aussi pour la prévision des inondations.

En lien avec le paragraphe 1.2, il est important de rappeler que, comme pour tout type de modélisation, les objectifs et domaines d'utilisation visés (prévention, prévision, gestion de crise) imposent des contraintes sur le type de modèle exploité. Pour la prévention des inondations, l'objectif est de reproduire le plus précisément possible les écoulements dans la plaine, ce qui implique souvent l'emploi de modèles complexes et longs en temps de calcul. A l'inverse, dans le cadre de la prévision, les modèles employés doivent être rapides et simples à mettre en œuvre de manière à fournir des résultats de façon précise, mais surtout le plus vite possible. En conséquence, selon l'application visée, le niveau de complexité du modèle doit être adapté.

Dans ce contexte, le paragraphe 1.2.2 explique les concepts liés à la modélisation hydraulique des inondations et les différents types de modèles hydrauliques.

1.2.2.1 Le concept de modèle hydraulique

La modélisation hydraulique vise à prédire numériquement l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue : débits, vitesses, hauteurs d'eau dans la plaine. Cela

permet en particulier de connaître les surfaces inondées, les durées de submersion et la vitesse de montée des eaux au cours de la crue.

Un modèle est une représentation schématique, et donc simplifiée, d'un système réel. (Roux, 2004). Les modèles hydrauliques abordés dans la thèse sont déterministes (ensemble des paramètres supposés connus exactement), distribués (paramètres et variables non uniformes dans l'espace) et mécanistes (mécanismes internes décrit par des lois physiques). Ils sont définis par :

- des équations physiques à résoudre,
- un domaine de calcul caractérisé par une géométrie (discrétisation spatiale qui définit le type du modèle), des limites dans l'espace et le temps,
- des paramètres hydrauliques (coefficients de frottement...) et topographiques,
- des conditions aux limites (la plupart du temps à l'amont et à l'aval de la partie de cours d'eau modélisée),
- des conditions initiales.

1.2.2.2 *La physique d'un modèle hydraulique : les équations à résoudre*

Les modèles hydrauliques utilisés pour l'étude des inondations de plaine sont pour la plupart basés sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant (équations tridimensionnelles de Navier-Stokes intégrées sur la verticale) (Roux, 2004). Au point M, de coordonnées (X,Y), les équations de Barré de Saint-Venant s'écrivent, dans leur version la moins simplifiée, en absence de singularité hydraulique (Roux, 2004) :

Équation de la continuité :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(H\mathbf{V}) = q \quad (1.2)^2$$

Équation de la dynamique (conservation de la quantité de mouvement) :

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} + g \left(\nabla Z + \frac{\mathbf{V}\|\mathbf{V}\|}{K_s^2 H^{4/3}} \right) = 0 \quad (1.3)$$

Dans les équations (1.2) et (1.3), H est la hauteur d'eau (m), V le vecteur vitesse (m.s⁻¹) de composantes V_x et V_y (vitesses moyennes sur la verticale dans les directions x et y), q les éventuels apports (q ≥ 0) ou pertes (q < 0) au m² (m.s⁻¹), Z la cote de la surface libre (m) et K_s le coefficient de Strickler (m^{1/3}.s⁻¹), qui traduit le freinage à l'écoulement.

Remarque : en présence de singularités hydrauliques, d'autres équations appelées lois d'ouvrages sont couramment utilisées pour décrire localement les écoulements. Ces équations prennent des formes diverses selon le type de singularité (ponts, digues, seuils, barrages, écluses...) et sont en particulier fonction de la géométrie de la singularité considérée.

En hydraulique, trois types de régime d'écoulement sont couramment distingués : le régime permanent pour lequel les caractéristiques hydrauliques (débit, hauteurs, vitesses) sont invariantes au cours du temps et les régimes graduellement et rapidement variés pour lesquels les paramètres hydrauliques

² les caractères **gras** désignent des vecteurs et ∇ désigne l'opérateur différentiel.

varient respectivement lentement et rapidement le long de l'écoulement. Dans le cadre de la modélisation hydraulique des inondations de plaine abordée dans la thèse, l'hypothèse est faite que les écoulements sont graduellement variés.

1.2.2.3 Typologie des modèles hydrauliques

Dans le document nous ne nous intéresserons pas aux modèles tridimensionnels (3D) moins fréquemment utilisés dans le cadre des inondations de plaine au sens de débordement de cours d'eau. Selon la forme de la géométrie utilisée, il est possible de distinguer en particulier trois types de modèles hydrauliques : 1) les modèles bidimensionnels (2D), 2) les modèles monodimensionnels (1D), 3) les modèles hybrides à casiers.

Les modèles bidimensionnels

Ils résolvent les équations bidimensionnelles de Saint-Venant - équations (1.2) et (1.3). Les calculs sont effectués sur un maillage en deux dimensions de plaine d'inondation. Ce maillage peut être régulier - e.g. : RASTER (carrés) - ou irrégulier - e.g. : triangles ou quadrangles irréguliers- (Bates & de Roo, 2000; Horritt & Bates, 2001). Au centre de chaque maille, ou sur chaque nœud du maillage, sont imposées une altitude du sol (ou le cas échéant du fond de la rivière) et une valeur des paramètres hydrauliques. Les modèles bidimensionnels permettent de calculer les champs de hauteur et de vitesse dans chaque maille. Ils ont ainsi pour avantage de représenter les écoulements dans toutes les directions du plan horizontal, en particulier transversales (non parallèles aux cours d'eau). Ils sont couramment utilisés pour accéder au champ des vitesses bidimensionnel (Roux, 2004). Les points faibles de ces modèles sont une mise en œuvre très lourde et des temps de calculs très longs. C'est pourquoi les modèles 2D sont moins fréquemment utilisés dans un contexte de prévision que les modèles 1D ou hybrides. Par contre, ils sont pertinents dans le cadre de la prévention, où la contrainte de temps est moins importante, ou lorsque la modélisation filaire est mise en défaut (Horritt & Bates, 2002).

Les modèles monodimensionnels (1D)

Les modèles hydrauliques monodimensionnels, aussi appelé 1D ou filaire, reposent sur une représentation géométrique de la plaine (lit mineur compris) sous forme de profils en travers repérés par leur abscisse curviligne sur un profil en long (Figure 1.7). Dans cette approche, l'écoulement est considéré canalisé, i.e. organisé suivant une direction préférentielle appelée axe d'écoulement, invariante au cours du temps.

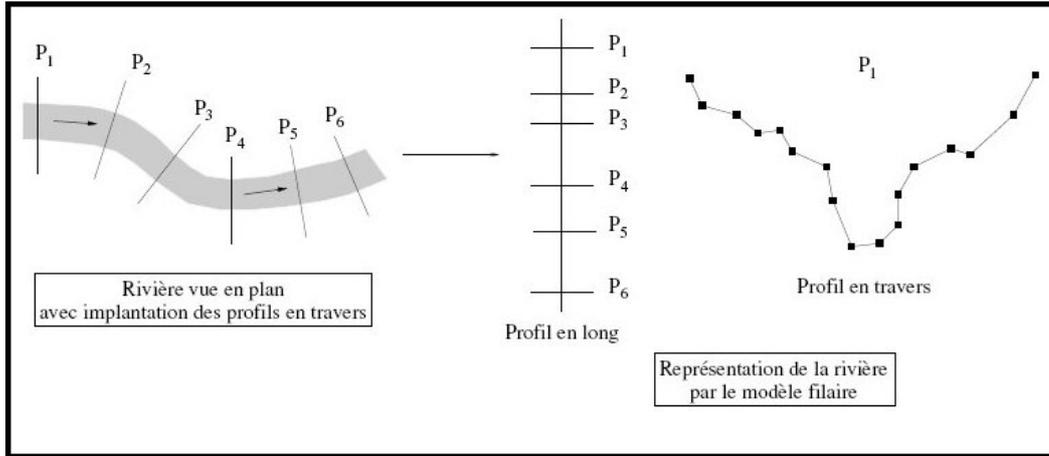


Figure 1.7 : Représentation d'un cours d'eau par un modèle monodimensionnel (Roux, 2004)

En monodimensionnel, en absence de singularité hydraulique, les équations de St-Venant peuvent être simplifiées sous la forme suivante :

Équation de la continuité :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (1.4)$$

Équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) V + gS \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + J \right) = k_L q_L V \quad (1.5)$$

Dans les équations (1.4) et (1.5), S est la section mouillée, c'est-à-dire l'aire de la section transversale occupée par le fluide (m^2), Q le débit ($m^3 \cdot s^{-1}$), q_L le débit d'apport ($q_L \geq 0$) ou de fuite ($q_L < 0$) par unité de longueur ($m^2 \cdot s^{-1}$), g l'accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$), Z la cote de la surface libre (m), J la pente de la ligne d'énergie ($m \cdot m^{-1}$) également appelée perte de charge linéaire, k_L est un coefficient tel que :

$$k_L = \begin{cases} 1 & \text{si } q_L < 0 \\ 0 & \text{si } q_L \geq 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

V est la vitesse moyenne dans un profil en travers ($m \cdot s^{-1}$), x l'abscisse curviligne (m) et t le temps (s). La Figure 1.8 (p.23) schématise les différents paramètres de ces deux équations.

Par ailleurs, en régime graduellement varié, entre deux profils en travers de la géométrie suffisamment proches, le régime d'écoulement peut être considéré permanent. En conséquence, d'après une extrapolation de la formule de Manning-Strickler (en théorie valable uniquement en régime permanent) :

$$V = K_S R_H^{2/3} J^{1/2} \quad (1.7)$$

(où R_H désigne le rayon hydraulique (m), quotient de la section mouillée S par le périmètre mouillé P_w (Figure 1.8, p.23) et K_S le coefficient de frottement de Strickler), il est possible d'exprimer J en fonction des caractéristiques et des paramètres hydrauliques et géométriques :

$$J = \frac{Q|Q|}{(K_S R_H^{2/3} S)^2} \quad (1.8)$$

Dans la formule (1.8), il est important de noter que le seul paramètre indépendant de la topographie de la plaine pour lequel un choix de valeur doit être fait est le K_S . Par ailleurs, $D = K_S R_H^{2/3} S$ est appelé la débitance hydraulique de la section en travers considérée.

NB : dans les modèles hydrauliques anglo-saxons, le coefficient de frottement est plus souvent représenté par le **coefficient de Manning n**, qui n'est autre que l'inverse du coefficient de Strickler.

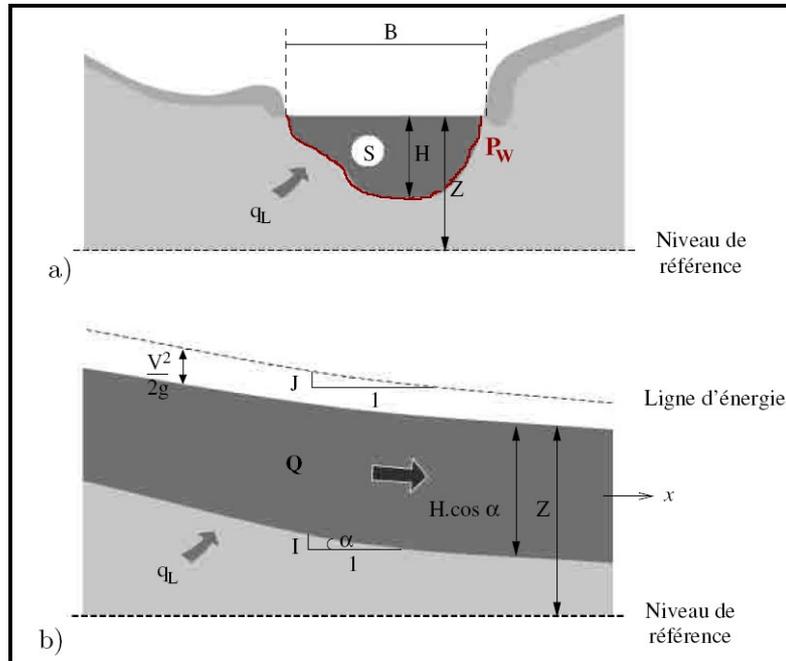


Figure 1.8 a) et b) : Variables hydrauliques intervenant dans les équations de Saint-Venant 1D (Roux, 2004).

a) profil en travers, b) profil en long.

La simplification monodimensionnelle des équations de Barré de Saint-Venant - équations (1.4) et (1.5) - et l'expression de J - équation (1.8) - impliquent les hypothèses suivantes (Lane, 1998; Raclot, 2003a; Roux, 2004) :

- la surface libre est horizontale sur une section en travers : le niveau d'eau y est uniforme,
- l'écoulement est graduellement varié,
- la pente moyenne longitudinale de la surface libre est faible,
- l'axe de l'écoulement est assimilé à une ligne droite, c'est-à-dire que le rayon de courbure de l'axe du cours d'eau est très grand,
- les pertes par frottements (c'est à dire l'expression de J) peuvent être calculées à l'aide des formules d'écoulement uniforme traditionnelles comme l'équation de Manning-Strickler.

La modélisation hydraulique monodimensionnelle est très pertinente pour des écoulements débordant peu du lit mineur (Weber & Menéndez, 2004). Les résultats restent satisfaisants lorsque le débordement est important, à condition que la plaine d'inondation ne présente pas de trop fortes singularités, comme des obstacles transversaux par exemple, et que la topologie de la rivière n'évolue pas avec le débit - coupure de méandres, écoulement dans des bras normalement à sec... (Roux, 2004).

Le principal inconvénient des modèles 1D est de ne pas prendre en considération les écoulements transversaux, ce qui entraîne une incapacité à reproduire les phénomènes de stockage temporaires dans certaines zones des plaines alluviales en période de crue (Horritt & Bates, 2002).

Les modèles 1D-casier

Pour surmonter les limites des modèles filaires (en particulier l'absence d'écoulements transversaux) sans pour autant employer des modèles 2D, une solution intermédiaire est offerte dans les modèles hybrides qui combinent les visions 1D et 2D. En particulier, les modèles 1D à casiers complètent la représentation monodimensionnelle en introduisant des zones de stockage. Les limites des zones de stockage sont définies par des structures hydrauliques naturelles (lignes d'arbres, talus...) ou artificielles (digues, voies de circulations surélevées...). Au sein des zones de stockage, appelées casiers, le niveau d'eau est supposé constant. En conséquence, le comportement hydraulique de chaque casier est défini par une relation hauteur-volume. De plus, la taille et la forme des casiers doivent être ajustées aux caractéristiques hydrauliques (hauteurs d'eau et vitesses) et morphologiques (pentes) de la plaine (Raclot, 2003a). Les caractéristiques d'écoulement (remplissage / vidange) entre casiers connexes et entre les casiers et l'écoulement principal sont définies par des lois d'ouvrage, le plus souvent de type déversoir ou vanne.

1.2.2.4 Paramètres des modèles hydrauliques

La liste des paramètres des modèles hydrauliques fournie dans cette section n'est pas exhaustive. Elle représente les paramètres les plus courants dans le cadre de la modélisation hydraulique.

Condition initiale et conditions aux limites

La condition initiale définit la configuration hydraulique de la plaine (valeurs des caractéristiques hydrauliques : débit, vitesses et hauteurs) à l'instant de départ du calcul (Bates & Anderson, 1996). En général, la configuration initiale de la plaine n'est pas connue en tout point du maillage du modèle.

Les conditions aux limites définissent les caractéristiques hydrauliques aux limites du domaine de calcul (zones d'apport et de fuite des écoulements). Sans fuites et apports latéraux (autres que ceux de la rivière principale), ces caractéristiques hydrauliques peuvent être l'évolution temporelle des hauteurs d'eau (limnigrammes), des vitesses, des débits (hydrogrammes) ou des relations entre ces variables dans les sections amont et aval modèle.

Le coefficient de rugosité

Il est également nécessaire de connaître la rugosité (coefficient de Strickler) en chacun des points de calcul (Werner et al., 2005). Cependant, cette information est rarement disponible car il est peu envisageable de mettre en œuvre des campagnes de mesure de coefficient de Strickler pour chaque maille du modèle.

Par ailleurs, selon le type de schéma d'écoulement et le modèle hydraulique utilisé, le coefficient de frottement peut prendre une signification différente et la sensibilité du modèle à ce coefficient peut être variable (Horritt & Bates, 2002). En conséquence, dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique, selon le schéma d'écoulement et le modèle utilisé, les valeurs calées ne seront pas nécessairement les mêmes.

Dans sa définition initiale, le coefficient de frottement de Strickler décrit l'état « rugueux » du terrain dans le lit de la rivière. Cette rugosité de surface est le résultat de plusieurs influences (CETMEF, 2001; Roux, 2004) :

- la rugosité « de peau » des matériaux constitutifs du lit, c'est-à-dire la taille des aspérités de surface,
- la rugosité « de forme » de ces mêmes matériaux (arêtes tranchantes, arrondies, . . .),
- la rugosité « de morphologie » liée à l'agencement des matériaux.

Cette définition est généralement plus adaptée à une modélisation bidimensionnelle. Dans un schéma d'écoulement 1D, le coefficient de Strickler intègre de façon plus globale les freinages à l'écoulement, en particulier la morphologie de la rivière - caractère méandreux, canalisé, rétrécissements...- et les structures hydrauliques transversales dans la plaine. En effet, d'après (Yen, 2002) :

« While in 2D or 3D simulations of local phenomena, the use of local resistance is required, in 1D simulation of open-channel flows, it is the reachwise or cross sectional resistance coefficient that is practically useful »³.

En conséquence, selon l'échelle de modélisation de la plaine alluviale, le coefficient de Strickler représente les freinages à l'écoulement à des échelles différentes. Il tend ainsi, en complément de sa signification initiale, à compenser les différences de représentation entre modèles, comme l'annoncent (Horritt & Bates, 2002) :

« In any case, the different responses indicate that for some or all of the models, friction parameters are being used to compensate for different process representations, and are not simply parameterising the bed friction terms, as we would wish »⁴.

Les lois d'ouvrages

Les ouvrages (digues, ponts, seuils, barrages, ...) conditionnent les écoulements hydrauliques (Fouchier et al., 2004). En présence d'ouvrages hydrauliques ou dans le cas d'une modélisation hydraulique 1D-casier, le modèle comprend des lois d'ouvrage afin de modéliser les écoulements de façon pertinente sur les ouvrages ou les limites des casiers. Ces lois contiennent un certain nombre de paramètres qui s'ajoutent malheureusement à la liste des paramètres très souvent inconnus a priori.

La détermination des paramètres d'un modèle hydraulique

L'ensemble des paramètres hydrauliques nécessaires à la modélisation hydraulique est rarement connu. Par conséquent, des méthodes de détermination des valeurs de ces paramètres sont nécessaires. Elles nécessitent des connaissances complémentaires comme par exemple des niveaux d'eau, des

³ Alors que pour des simulation 2D ou 3D des phénomènes locaux l'utilisation de la résistance locale est requise, pour la simulation 1D des écoulements à surface libre, c'est la résistance du bief ou du profil en travers qui est utile en pratique.

⁴ Quoi qu'il en soit, les réponses différentes indiquent que, pour tout ou partie des modèles, les paramètres de friction servent à compenser les différentes représentations des processus, et pas simplement à paramétrer les frictions du lit comme nous le souhaiterions.

débits ou des surfaces inondées issues de mesures in situ ou de télédétection (en particulier images satellitaires).

Les méthodes de détermination des paramètres d'un modèle hydraulique peuvent prendre plusieurs formes :

- l'expertise hydraulique : détermination des paramètres a priori à partir de données complémentaires par un expert,
- le calage du modèle hydraulique : recherche, par itération, des paramètres hydrauliques qui permettent de faire concorder au mieux les résultats du modèle à des observations,
- l'inversion mathématique du modèle hydraulique (utilisations de modèle adjoint) : calcul des paramètres hydrauliques à l'origine de résultats de simulation égaux à des observations (Castaings et al., 2003; Honnorat et al., 2005).

Les problématiques liées à la détermination des paramètres de modèles hydrauliques seront analysées plus en détail dans la suite du document et en particulier dans le paragraphe 3.3 et le Chapitre 6.

1.3 Données disponibles et données attendues dans la gestion et la modélisation hydraulique des inondations

Dans le cadre de la gestion et de la modélisation hydraulique des inondations, la disponibilité d'observations est une problématique très importante. Selon l'aspect de la gestion des inondations abordé, les données utiles peuvent être différentes. Le paragraphe 1.3 présente les différentes données potentiellement disponibles et leurs apports pour la gestion des inondations.

1.3.1 Les données hydrométriques

1.3.1.1 Les données ponctuelles distribuées dans le temps

Les mesures de niveaux d'eau

Les mesures de niveau d'eau en lit mineur, dites limnimétriques, sont ponctuelles, c'est à dire effectuées en un ou plusieurs points sur des linéaires plus ou moins longs de rivières. Dans le cas des stations hydrométriques automatisées, elles sont distribuées dans le temps (e.g. : 1 mesure par heure).

Elles sont particulièrement profitables à la modélisation hydraulique car source importante de conditions initiales, de conditions aux limites, mais aussi de données de calage et de validation. Cependant, dans le cas où elles sont seules disponibles, leur efficacité pour le calage de modèles peut s'avérer limitée (Horritt, 2002).

Bien que courantes pour les grands cours d'eau français et en particulier pour les voies navigables, ces données ne sont pas nécessairement disponibles pour les autres cours d'eau.

Les estimations de débits

Des mesures limnimétriques sont la plupart du temps déduites des estimations de débits transitant dans en lit mineur. Ces estimations de débits sont rendues possibles grâce à la construction empirique de courbes de tarage. Ces dernières sont estimées à partir de jaugeages. Les techniques de jaugeage du débit (e.g. mesures de vitesses par moulinets, mesures par dilutions) sont souvent complexes et lourdes à mettre en oeuvre. Elles ne sont pas nécessairement réalisables en période de crue à cause des dangers encourus lors de la mesure et de l'inaccessibilité des points de mesure. En conséquence, les jaugeages de débits ne sont effectués la plupart du temps que pour quelques valeurs de niveaux d'eau. Les courbes de tarage correspondent alors à une interpolation et une extrapolation des valeurs de débits jaugés. Par ailleurs, en cas de débordement du cours d'eau, la mesure du débit en lit mineur ne donne aucune information concernant le débit en lit majeur.

Les courbes de tarage souffrent par conséquent des imperfections dues à l'interpolation et l'extrapolation. D'une part, en période de crue, les vitesses d'écoulement en lit mineur augmentent fortement et tendent à modifier la géométrie de celui-ci. Cela peut entraîner une modification de la relation hauteur/débit qui rend la courbe de tarage obsolète. D'autre part, la relation hauteur débit est rarement univoque ; il existe des effets d'hystérésis qui ne sont pas toujours pris en compte dans les courbes de tarage (Pappenberger et al., 2005a). En conséquence, les principaux inconvénients des courbes de tarage sont une fiabilité limitée et des incertitudes importantes sur les débits estimés non jaugés. Elles ont néanmoins un intérêt important dans le cadre de la modélisation hydraulique car elles peuvent être utilisées comme condition aux limites aval, en particulier pour les modèles filaires.

Par ailleurs, des systèmes de mesure débitométriques en continu par SONAR sont quelquefois mis en place. Ils mesurent la vitesse de surface de l'eau en lit mineur et en déduisent une estimation du débit connaissant la bathymétrie. Bien que donnant une estimation relativement fiable du débit, ces systèmes de mesures sont rarement opérationnels en période de crue, ce qui limite leurs applications pour l'étude des inondations.

Une autre donnée utilisée dans le cadre du calage de modèles hydrauliques est le temps de transfert (Horritt & Bates, 2002; Pappenberger et al., 2005b). Celui-ci correspond au temps séparant le passage du débit de pointe à l'amont et à l'aval de la zone d'étude. Ce temps de transfert peut en particulier être calculé à partir des hydrogrammes ou limnigrammes amont et aval, lorsque ceux-ci sont disponibles.

1.3.1.2 Les données ponctuelles et instantanées : laisses de crues et plus hautes eaux

Après une inondation, des campagnes de mesures sont parfois organisées afin de relever des traces laissées par la crue, appelées laisses de crue. Lorsque les informations collectées concernent l'altitude des laisses de crues, on parle de Plus Hautes Eaux (PHE), qui renseignent sur les niveaux d'eau maximaux locaux atteints par la crue au cours de l'épisode hydrologique. Les PHE sont mesurées sur le terrain à partir des traces du passage de la crue sur les murs des bâtiments, le sol et des témoignages des riverains. Ces données sont très utiles pour la caractérisation des dommages occasionnés par la crue (hauteurs d'eau dans les maisons...), et de la vulnérabilité. De plus, ces données sont pertinentes pour le calage et la validation de modèles hydrauliques (Matgen et al., 2004). Par rapport aux données

limnimétriques elles apportent une vision plus étendue de l'inondation. Par contre, elles ont pour inconvénients d'être instantanées et de ne pas résulter d'une observation directe de la crue.

1.3.1.3 Les données instantanées et réparties dans l'espace, issues de la télédétection

Les photographies aériennes et les images satellitaires acquises en période de crue sont très pertinentes pour la gestion des inondations (Puech & Bailly, 2003). D'une part, elles fournissent des informations qualitatives concernant l'état de submersion des infrastructures de communications (routes, voies ferrées coupées...), qui peuvent s'avérer très utiles pour l'organisation des secours en contexte de crise. D'autre part, ces données permettent d'accéder à des informations instantanées mais réparties dans l'espace concernant les surfaces inondées, et les niveaux d'eau dans la plaine par croisement avec des données topographiques (Raclot, 2003a; Smith, 1997). L'exploitation des données d'observation de la Terre pour la gestion des inondations constitue le cœur du travail de thèse et sera abordée plus en détail tout au long du document.

Les données hydrométriques présentées précédemment sont des informations très utiles à la modélisation hydraulique pour la définition des conditions initiales et aux limites, mais aussi le calage et la validation des modèles.

Cependant, elles ne représentent qu'une partie des informations nécessaires à la mise en place d'un modèle hydraulique. En effet, dans une modélisation hydraulique, les informations concernant le relief (topographie) de la plaine alluviale sont indispensables (Bates et al., 2003; Garrote & Bras, 1995). De plus, elles sont très utiles pour des estimations locales de niveaux d'eau à partir de données de laisses de crues ou de limites d'inondation issues d'images de télédétection (cf. Chapitre 3 et Chapitre 5).

C'est pourquoi, le paragraphe 1.3.2 présente les sources potentielles et les modalités d'obtention des données topographiques.

1.3.2 Les données topographiques

Les données topographiques fournissent l'altitude de la surface de la Terre et proviennent de mesures discrètes, c'est à dire en un nombre fini de points de l'espace.

1.3.2.1 Formats des données topographiques

Leurs formats sont multiples. En particulier, il est possible de distinguer les données discontinues des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Les données discontinues peuvent être constituées de semis de points cotés (répartis régulièrement dans l'espace ou non), de lignes (et/ou polygones) en trois dimensions (dont courbes de niveau et profils topographiques). Les MNT offrent une représentation « continue » du relief. Ils peuvent être à maille régulière (e.g. format RASTER : image sous forme de pixels⁵), ou à maille irrégulière (e.g. TIN : réseau de triangles irréguliers) (Puech, 2000).

⁵ Plus petit élément représenté sur l'image

Sur les MNT, deux représentations sont possibles :

- soit l'altitude est constante sur chaque maille, comme au format RASTER,
- soit l'altitude est définie sur les nœuds de chaque maille et interpolée (e.g. : interpolation linéaire, polynomiale...) à l'intérieur de la maille.

Par ailleurs, au sein des MNT, on peut distinguer deux types de modèles selon que l'information altimétrique fournie concerne l'altitude du sol terrestre ou, le cas échéant, l'altitude du « sursol » (toit du couvert végétal, des bâtiments...). Il n'existe pas actuellement de vocabulaire normalisé pour désigner ces différents Modèles Numériques de Terrain. Dans certains documents, il est possible de trouver le terme Modèle Numérique de Surface comme terme générique, se déclinant en MNT ou MNE (Modèle Numérique d'Élévation, en lien avec la terminologie anglophone), selon que l'information fournie est l'altitude du sol ou du sur-sol. Dans ce document, en accord avec un vocabulaire couramment utilisé en hydraulique fluviale et en hydrologie, nous utiliserons les définitions suivantes :

- Les Modèles Numériques de Terrain fournissent l'altitude du sol terrestre.
- Les Modèles Numériques de Surface (MNS) fournissent, le cas échéant, l'altitude du « sursol » (toit du couvert végétal, des bâtiments...).

Étant donnée que l'information utile en hydraulique fluviale est l'altitude du sol, nous n'exploiterons dans la thèse que des Modèles Numériques de Terrain.

Les techniques de constructions des données topographiques sont multiples. La plupart du temps, elles sont issues de mesures sur le terrain - topométrie par théodolite, GPS... - ou de techniques de télédétection (Charleux-Demargne, 2001). Dans la suite du paragraphe, seules les données topographiques issues des techniques de télédétection seront considérées.

1.3.2.2 Méthodes de construction de données topographiques à partir de données de télédétection

Le Tableau 1.1 synthétise les différentes méthodes, basées sur des techniques de télédétection active ou passive, utilisées pour la création de données topographiques. Il est important de noter que la technique de télédétection la plus utilisée pour la création de données topographiques reste à ce jour la photogrammétrie. Une solution émergente depuis quelques années est le LiDAR qui devrait permettre des acquisitions de plus en plus systématiques sur de grands linéaires de cours d'eau avec des précisions adaptés à l'hydraulique fluviale.

Donnée de base	Images satellitaires ou photographies aériennes optiques	Images satellitaires radar	LiDAR aéroporté
Technique d'acquisition	passive	active	active
Méthode de détermination des altitudes	photogrammétrie, clinométrie	radargrammétrie, radarclinométrie, interférométrie	altimétrie directe par distance optique

Tableau 1.1 : Méthodes utilisées pour la création de MNT (Raclot, 2003a), basées sur des techniques de télédétection.

Les capteurs passifs utilisent le rayonnement naturel de la Terre ou le rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre pour acquérir des images. Au contraire, les capteurs actifs émettent une onde en direction de la surface de la Terre et mesurent les caractéristiques du signal rétro-diffusé. Les techniques de télédétection satellitaire active et passive seront présentées plus en détail dans le Chapitre 2.

La photogrammétrie et la radargrammétrie utilisent la vision stéréoscopique de couples d'images (ou photographie) optiques ou radar acquises de points de l'espace distincts. La vision stéréoscopique est rendue possible grâce aux déformations géométriques du relief sur les images (Charleux-Demargne, 2001; Polidori, 1997). Les déformations géométriques du relief sur les images optiques et radar seront présentées de façon plus détaillée dans les paragraphes 2.1.3 et 2.2.5. De façon schématique, les techniques de photogrammétrie et la radargrammétrie nécessitent la saisie (manuelle ou automatisée) de points (ou lignes) homologues sur les couples d'image. Ces points sont des objets identifiables sur les deux images du couple utilisé. Les variations des positions relatives des points homologues d'une image à l'autre permettent de déduire les différences d'altitude entre ces objets. En conséquence, avec un point de référence des altitudes sur les images, il est possible de connaître l'altitude de l'ensemble des points homologues.

La clinométrie (respectivement la radarclinométrie) exploite les variations de radiométrie⁶ dues au relief sur les images optiques (respectivement radar). Elle est basée sur une reconstruction du relief par ombrage. Cette technique n'est applicable qu'à des images sur lesquelles les variations de radiométrie sont dues uniquement aux variations de pentes du terrain (e.g. forêt tropicale) (Charleux-Demargne, 2001). Elle permet de construire des ébauches de MNT pour des applications peu exigeantes en terme de précision (Paquerault & Maitre, 1997).

L'interférométrie radar exploite les variations de phase du signal radar dues au relief sur un couple d'images, préalablement recalées géographiquement et acquises dans les mêmes conditions géométriques (Dupont, 1997). De la variation de phase sur un pixel est déduite la différence de distance parcourue par le signal radar entre les deux images. Connaissant la position des deux antennes (ou de la même antenne aux deux dates d'acquisition des images) dans l'espace, il est possible d'estimer l'altitude du point au sol à partir de points de contrôle.

L'altimétrie directe par LiDAR utilise un faisceau LASER pour calculer l'altitude du sol. Les systèmes LiDAR émettent un faisceau LASER à la verticale de leur position en direction de la surface de la Terre et mesurent le temps d'aller retour de l'onde. Connaissant la position du capteur et la célérité de l'onde LASER dans l'atmosphère, il est possible de retrouver l'altitude du terrain à la verticale du capteur. Un des points forts de certains systèmes LiDAR est leur capacité à déterminer l'altitude du sol et du sursol en présence de végétation grâce à une pénétration partielle du signal LASER à travers le couvert végétal.

⁶ Le terme radiométrie désigne la valeur (compte numérique) des pixels sur une image. Celle-ci est fonction de la partie de l'intensité du signal réfléchi par la surface terrestre qui est mesurée par le capteur.

1.3.2.3 *Qualité, Précision et incertitudes des données topographiques*

La notion de qualité d'une donnée topographique n'est pas absolue, mais liée à l'échelle d'observation et d'appréhension souhaitée. En effet, d'après (Puech, 1993) :

« Un MNT, défini avec une maille et une méthode d'interpolation, n'est pas valable et acceptable pour toute application. »

En particulier, dans le cadre de l'étude des inondations, les exigences sur la qualité des données topographiques ne seront pas les mêmes si les phénomènes sont étudiés à l'échelle du bassin versant ou de la plaine d'inondation. La présentation qui suit s'intéresse plus particulièrement à l'analyse à l'échelle de la plaine, dans un objectif de modélisation hydraulique.

Les critères qui décrivent la qualité d'une donnée sont divers. Nous avons choisi dans ce document les définitions suivantes :

- le niveau de détail de la mesure ou arrondi,
- l'incertitude qui traduit la confiance qu'on attache à une mesure (elle peut être décrite par un intervalle de confiance autour de la mesure),
- la précision (exactitude) qui exprime l'accord entre une mesure et la réalité.

Pour qualifier la qualité des données topographiques pour des besoins en hydraulique fluviale, plusieurs critères doivent être pris en compte. Le critère le plus couramment utilisé, et souvent le seul retenu, est la précision altimétrique estimée au travers de l'erreur quadratique moyenne relative (RMSE) calculée sur un ensemble de points de contrôle dont l'altitude réelle est connue par ailleurs (Raclot, 2003a).

Cependant, la précision altimétrique n'est pas le seul critère déterminant pour qualifier la qualité d'un MNT. En effet, cette information n'est que locale et ne renseigne pas sur l'adéquation globale des données topographiques au relief réel. Comme il a été dit précédemment, les données topographiques sont issues de mesures discrètes. En conséquence, la qualité des données topographiques dépend des caractéristiques spatiales (dans le plan horizontal X,Y) de l'échantillonnage. (Blöschl & Silvapan, 1995) proposent trois grandeurs caractérisant l'échantillonnage. Appliquées aux données topographiques, ces grandeurs sont (Raclot, 2003a) (Cf. Figure 1.9):

- le domaine d'échantillonnage (emprise spatiale des données topographiques),
- la distance d'échantillonnage (distance entre deux mesures consécutives d'altitude, pouvant être constante ou variable dans le plan XY),
- la taille de support d'échantillonnage (dimensions de la surface de référence sur laquelle l'altitude mesurée est intégrée).

Dans le cadre de la modélisation hydraulique des inondations, la topographie doit avoir une précision altimétrique fine (par exemple de l'ordre du décimètre (Kreis, 2004)) et représenter les singularités hydrauliques telles que les digues ou les infrastructures de communication surélevées. Or, ces éléments sont souvent de taille restreinte (quelquefois inférieure au décimètre), ce qui implique pour les données topographiques d'avoir des distances et des tailles de support d'échantillonnage faible (inférieures aux dimensions des singularités hydrauliques de la plaine).

Dans le cas des données topographiques issues d'images de télédétection, la taille du support est égale à la résolution spatiale des images (taille du pixel), ce qui implique une grande importance du choix des images pour la création de données topographiques (Raclot, 2003a).

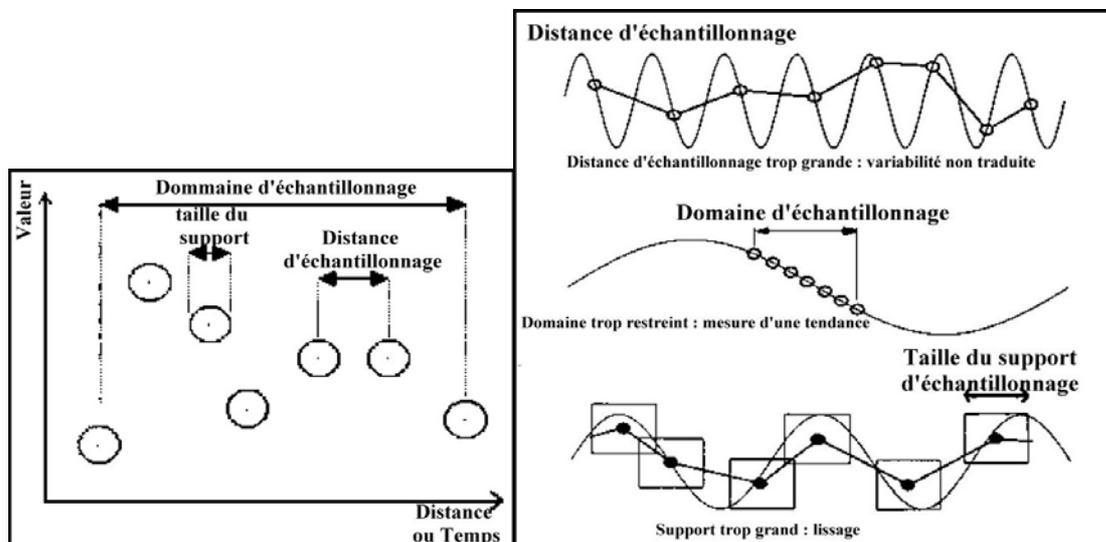


Figure 1.9 : Caractéristiques d'échantillonnage et qualité de l'information échantillonnée (adapté de (Blöschl & Silvapan, 1995))

Les données topographiques les plus précises actuellement sont les MNT LiDAR aéroportés (Cobby et al., 2001), avec une résolution spatiale métrique et une précision altimétrique (RMSE) allant jusqu'à 10cm (Kreis, 2004). Les MNT LiDAR apparaissent ainsi très prometteurs et adaptés à l'analyse hydraulique d'inondations à l'échelle de la plaine alluviale (Horritt & Bates, 2002; Kreis, 2004; Raclot, 2003a). De plus, leur capacité à appréhender sol et sursol font de ces données un outil pertinent pour la modélisation des inondations en zone de forêt.

Malgré une moins bonne précision altimétrique, les données topographiques issues de photographies aériennes à très haute résolution spatiale s'avèrent pertinentes pour l'étude des inondations à l'échelle de la plaine (Raclot, 2003a). Ces données peuvent en particulier être obtenues sous forme de semis de points cotés et de lignes 3D. Dans le cas particulier de photographies aériennes au 8000^{ème}, les précisions altimétriques (RMSE) peuvent être de l'ordre de 25cm, avec une distance d'échantillonnage minimale et une taille du support métriques.

Les MNT issus de télédétection satellite optique restent actuellement en retrait et peu utilisables pour des applications en hydraulique fluviale (Raclot, 2003a). Pour les satellites optiques à hautes résolutions spatiales (de l'ordre du décimètre) les MNT générés ont des précisions altimétrique de l'ordre de 10m (Robin, 2000). Dans le cas de satellites optiques à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre et en dessous), les précisions altimétriques sont de l'ordre de 2 m (Raclot, 2003a).

Les MNT issus de radargrammétrie donne par exemple des erreurs altimétriques de l'ordre de 50m et planimétrique de l'ordre de 30-40m dans le cas du radar français aéroporté Varan S, avec un angle d'environ 45° (Polidori, 1997). D'autre part, la radargrammétrie est très peu sensible aux hautes fréquences du relief (Polidori, 1997) ce qui la rend peu pertinente pour des applications en hydraulique fluviale.

Bien que les performances théoriques de l'interférométrie radar puissent être prédites, les performances réelles sont encore assez mal connues et peu présentes dans la littérature, en particulier à cause de conditions d'acquisition et de caractéristiques des paysages observés très variables dans les différentes études effectuées (Dupont, 1997; Polidori, 1997). A titre d'exemple, avec le système interférométrique spatial SRTM (X-SAR), (Ludwig & Schneider, 2006) ont observé une RMSE en altitude de l'ordre de 20m pour une résolution spatiale de 75m.

En conclusion, actuellement, les données altimétriques couramment disponibles et pertinentes pour la modélisation hydraulique des inondations sont les données topographiques LiDAR et issues de photogrammétrie sur photographies aériennes à Très Haute Résolution Spatiale, comme l'indiquent (Bates et al., 2003) :

« High resolution, high accuracy topographic data sets are becoming increasingly available for flood prediction studies in a number of countries. In the UK, for example, a national data collection program using airborne laser altimetry (LiDAR) and stereo air-photogrammetry is now generating large volumes of high-quality data, and in other countries an increasing number of ad hoc surveys are being flown. »⁷

⁷ Les données topographiques de haute résolution et de précision fine sont de plus en plus disponibles pour les études de prévision des crues dans de nombreux pays. Par exemple, au Royaume-Uni, un programme national d'acquisition de données LiDAR et de photogrammétrie sur photographies aériennes génère actuellement de grandes quantités de données de haute qualité, et dans d'autres pays un nombre croissant d'études *ad hoc* sont en cours.

Chapitre 2.

La télédétection par satellite

Sommaire

2.1	Télédétection satellitaire optique passive	35
2.1.1	Phénomènes de réflexion, de transmission et d'absorption	36
2.1.2	Le spectre électromagnétique	36
2.1.3	La télédétection satellite optique passive	37
2.1.4	Les principaux satellites optiques passifs	39
2.2	Télédétection satellitaire radar à synthèse d'ouverture	41
2.2.1	Fonctionnement du satellite radar latéral à synthèse d'ouverture	41
2.2.2	Résolution spatiale et synthèse d'ouverture	42
2.2.3	Radiométrie sur les images radar	44
2.2.4	Les paramètres qui influencent la rétro-diffusion	46
2.2.5	Morphologie du terrain et image radar : les distorsions géométriques	50
2.2.6	Les principaux satellites radar imageurs	51
2.2.7	La réponse de l'eau sur les images radar	53

Ce deuxième chapitre a pour objectif de décrire et d'expliquer les principes généraux des techniques de télédétection optique passive et radar à synthèse d'ouverture. Il vise ainsi à permettre une compréhension plus aisée des chapitres suivants dans lesquelles des images satellitaires d'inondations seront exploitées. En lien avec la problématique inondation, ce chapitre sera orienté vers la détection de l'eau sur les images. Il est décomposé en deux sections, l'une concernant la télédétection optique passive, l'autre la télédétection radar à synthèse d'ouverture.

De façon générique, la télédétection est définie comme (Journal officiel, arrêté du 25 septembre 1984) :

« l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ».

Dans les domaines de la télédétection, les satellites d'observation de la Terre visent à caractériser plus particulièrement la surface terrestre par mesure de l'intensité des champs électromagnétiques émis et réfléchis par celle-ci. Dans ce contexte, la plate-forme spatiale est appelée vecteur et dotée de différents capteurs qui assurent la mesure de l'intensité du champ électromagnétique.

2.1 Télédétection satellitaire optique passive

Cette première section du Chapitre 2 présente les principes de télédétection satellite optique passive. Pour tout complément d'information, il est possible de se référer en particulier à l'ouvrage de (Girard & Girard, 1999).

2.1.1 Phénomènes de réflexion, de transmission et d'absorption

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique parvient à la surface d'un objet, une part ρ de celui-ci est réfléchi (réflectance), une seconde part α (absorbance) est absorbée et une dernière part τ est transmise (i.e. : traverse l'objet sans être altérée) (Figure 2.1).

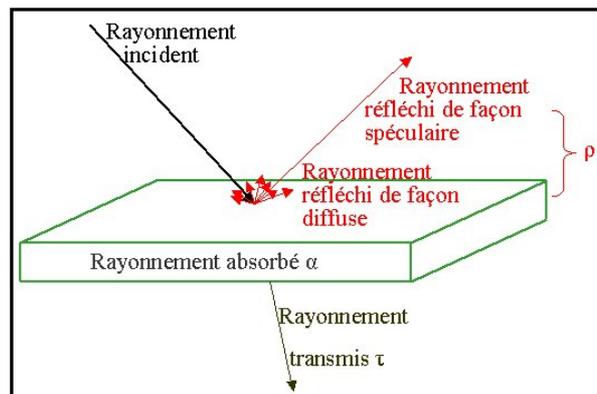


Figure 2.1 : Réflexion, absorption et transmission d'un rayonnement sur un objet.

Les satellites optiques enregistrent l'intensité du rayonnement (ou luminance) qui provient de la surface de la terre sur des bandes de fréquences (bandes spectrales) données du spectre électromagnétique.

2.1.2 Le spectre électromagnétique

Les bandes spectrales sont délimitées par deux longueurs d'ondes (ou fréquences). Elles sont schématisées sur la Figure 2.2 (p.37).

Toutes les bandes spectrales du rayonnement électromagnétique ne sont pas exploitées en télédétection satellite pour l'observation de la Terre (e.g. : Ultraviolets). Cela est en particulier dû au fait qu'une partie du spectre électromagnétique est absorbé par l'atmosphère (Figure 2.3, p.37). En conséquence, pour les longueurs d'ondes correspondantes, aucun rayonnement ne parvient aux satellites d'observation de la Terre. D'autre part, en raison de l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère terrestre, la caractéristique mesurée par un satellite n'est pas la réflectance des objets à la surface de la Terre. Pour retrouver cette dernière, il est nécessaire de quantifier la part de rayonnement absorbée par l'atmosphère.

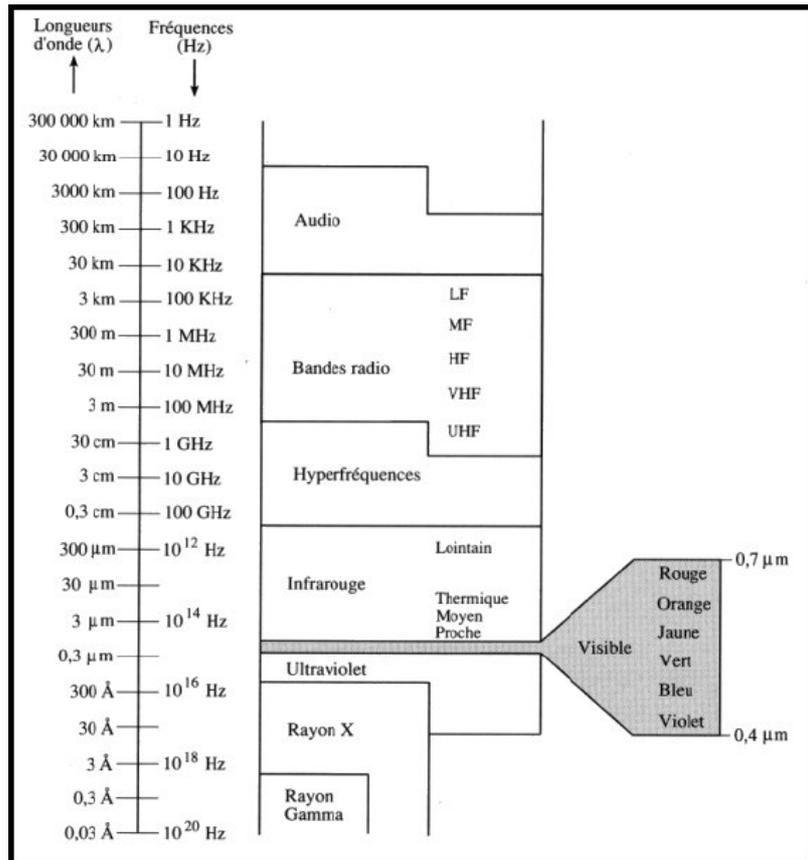


Figure 2.2 : Spectre électromagnétique et bandes spectrales (Bonn & Rochon, 1993)

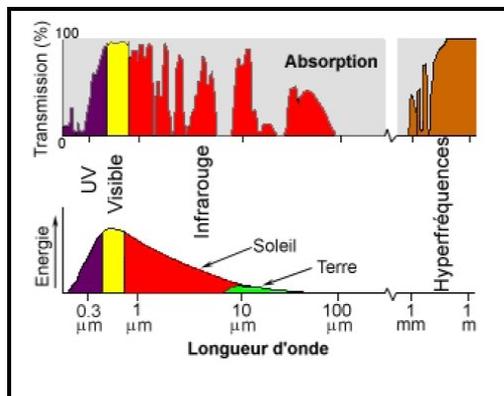


Figure 2.3 : Phénomène d'absorption dans l'atmosphère et spectre d'émission du soleil et de la Terre (CCT®).

2.1.3 La télédétection satellite optique passive

Méthode d'acquisition des images

Les satellites passifs acquièrent des images en mesurant l'intensité du rayonnement qui leur parvient de la Terre, ce rayonnement provenant d'une part du rayonnement propre de la Terre - en particulier dans l'InfraRouge Thermique (IRT) - et du rayonnement solaire réfléchi par la Terre - en particulier dans le visible et l'infrarouge (proche et moyen).

NB : Dans la suite du document, le terme **téledétection optique** sera entendu au sens de télédétection spatiale dans les bandes spectrales du **visible** et de l'**InfraRouge** (IR).

Géométrie d'acquisition des images optiques, et distorsions dues au relief

Toutes les images obtenues par télédétection sont soumises à des distorsions géométriques (CCT[®]). En particulier, les distorsions géométriques dues aux reliefs proviennent du fait que les techniques de télédétection tentent généralement de représenter des données prises à la surface de la Terre (en trois dimensions) sur une image bidimensionnelle (Figure 2.4, p.38). En conséquence, selon l'angle local de visée du satellite, les versants et les objets ont des formes différentes sur les images.

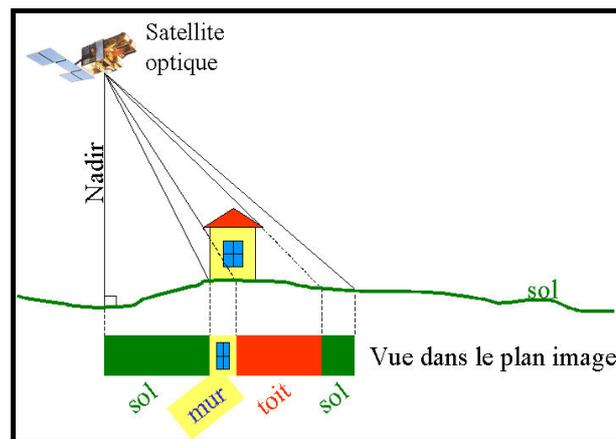


Figure 2.4 : Distorsions géométriques dues au relief sur images optiques.

Caractéristiques des images

Les images satellitaires optiques peuvent être caractérisées par quatre résolutions⁸ (Henry, 2004; Raclot, 2003a):

- La résolution spatiale caractérise la capacité du capteur à séparer deux objets proches au sol. Par ailleurs, on nomme pixel le plus petit élément représenté sur l'image. Le pixel est à rapprocher du grain sur le film en photographie argentique.
- La résolution spectrale désigne le pouvoir séparateur du capteur dans le spectre électromagnétique. Elle est liée au nombre et à la largeur des bandes spectrales mesurées par le satellite. En particulier, on distingue les capteurs multi-spectraux - mesures suivant plusieurs bandes spectrales (par exemple 4 pour le capteur HRVIR du satellite SPOT 4) -, des capteurs hyper-spectraux - mesures du rayonnement sur des bandes spectrales beaucoup plus nombreuses (par exemple 220 pour le capteur Hyperion du satellite EO-1) et la plupart du temps plus fines (CCT[®]).
- La résolution radiométrique caractérise le pouvoir du capteur à mesurer deux valeurs d'intensité du champ électromagnétiques peu différentes.
- La résolution temporelle, aussi appelée période de revisite qui caractérise le délai temporel entre deux survols de la même zone de la Terre.

⁸ Le terme résolution désigne le pouvoir séparateur du capteur.

Signatures spectrales et réponse de l'eau

En raison de caractéristiques réfléchives différentes vis à vis du rayonnement solaire, les objets ne réfléchissent pas la même quantité d'énergie. La signature spectrale d'un objet décrit son comportement réfléchif dans l'ensemble du spectre électromagnétique. A priori chaque type d'objet possède une signature spectrale propre qui est utilisée en télédétection pour discriminer les objets les uns des autres. La Figure 2.5 schématise les signatures spectrales des objets les plus courants à la surface de la Terre. En particulier, sur cette figure, l'eau apparaît avec un comportement très différent des autres types d'objets. En effet, la réflectivité de l'eau claire est globalement décroissante lorsque la longueur d'onde augmente et tend à s'annuler au-delà de la bande spectrale du rouge (Bukata et al., 1995). Ce comportement s'avère moins marqué pour les eaux turbides, pour lesquelles la signature spectrale intègre aussi les caractéristiques réfléchives des particules en suspension.

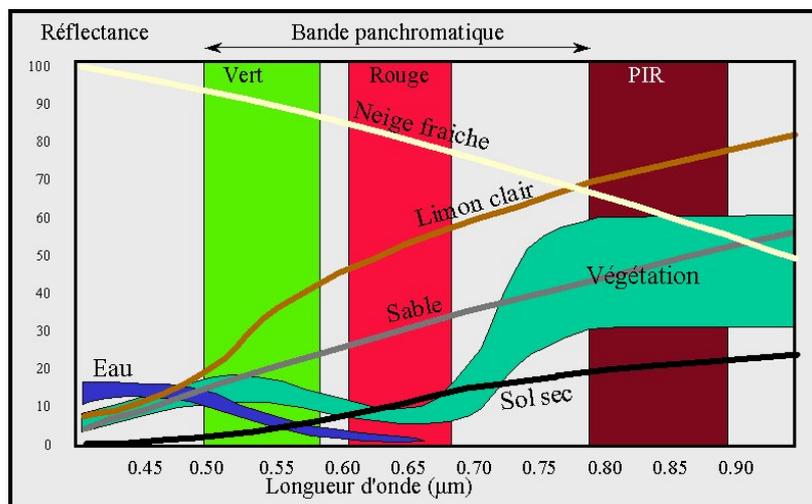


Figure 2.5 : Représentation schématique des signatures spectrales des principaux objets présents à la surface de la Terre - d'après (Maurel, 2001).

2.1.4 Les principaux satellites optiques passifs

Le Tableau 2.1 (p.40) présente les principaux satellites optiques passifs. Dans ce tableau les acronymes VIS, PAN, PIR, MIR, IRT désignent respectivement les bandes spectrales du VISible (Vert et Rouge et éventuellement Bleu), du PANchromatique (1 bande pour tout le visible), du Proche InfraRouge, du Moyen InfraRouge et de l'InfraRouge Thermique.

Satellite	Origine	Capteur	Année de lancement	Bandes spectrales	Fauchée (km)	Résolution spatiale (m)	Période de revisite (jours)
SPOT 1/3	France	HRV	1986	PAN	60-80	10	26 (jusqu'à 1 avec les 3 systèmes actifs)
				VIS, PIR		20	
SPOT 4		HRVIR	1998	Mono (Rouge)		10	
				VIS, PIR, MIR		20	
SPOT 5		HRG	2002	PAN		5-15	
				VIS, PIR, MIR		10	
Pléiades	Europe	HR	2006	VIS, PIR, MIR	<20	0,6-0,8	
		Champ Large		VIS, PIR, MIR	40	2,5	
		Multispectral		16-24 bandes			
ENVISAT	Europe	MERIS	2002	VIS, IR (16 bandes)	1500	300-1200	35
CORONA	USA	KH	1959-1969	PAN	16-20 x 220-270	24-36	-
Landsat		TM	1972	PAN	185	15	16
				VIS, PIR, MIR (TIR)		30 (120)	
IKONOS			1999	(PAN) VIS, PIR	13	(1) 4	11
Quickbird		BHRC 60	2001	(PAN) VIS, PIR	14-34	(0,61-1) 2,5-4	1-4
Orbview 3			2000	(PAN) VIS, PIR	8	(1) 4	<3
Terra		ASTER	1999	VIS, PIR, (MIR), (TIR)		15, (30), (90)	16
KFA-1000		Russie		1986	(PAN) VIS, PIR	27	(5) 10
KVR-1000			1984	PAN	40	2	
MK-4			1986	VIS, PIR, MIR	170	6-15	-
TK-350				PAN	200	10	
MONITOR E				PAN (VIS)	90 (160)	8 (20-40)	
MOS	MESSR		1987	VIS, PIR	100-200	50	17
IRS 1 A/B	Inde	LISS-1	1988	VIS, PIR	148	36	22
		LISS-11		VIS, PIR	74 x 2	72	
IRS 1 C/D		LISS-111	1995	VIS, PIR (MIR)	142	23 (70)	24
		PAN		PAN		6	5-24
JERS-1	Japon	OPS	1992-1998	VIS, PIR, MIR	75	18x24	44
ALOS		AV-NIR-2	2004	(PAN) VIS, PIR	(35) 70	(3) 10-15	(2) 45
EROS A	Israël		2000	PAN	12,5	1,8	3

Tableau 2.1 : Principaux satellites optiques passifs actuels, anciens (en italique) et futurs (en gras) (Henry, 2004).

2.2 Télédétection satellitaire radar à synthèse d'ouverture

Le paragraphe 2.2 explique les principes et caractéristiques de fonctionnement des satellites radar à Synthèse d'Ouverture (RSO). Pour tout complément d'information sur la télédétection radar, il est possible de se référer en particulier aux ouvrages de (Polidori, 1997), et (Ulaby & Dobson, 1989; Ulaby et al., 1981; Ulaby et al., 1982; Ulaby et al., 1986) dont ce paragraphe est en partie inspiré.

La plupart des satellites radar imageurs ont la capacité d'acquérir des images d'inondation de même qualité quelles que soient les conditions de nébulosité. Or, les crues s'accompagnent la plupart du temps d'un couvert nuageux important. Par conséquent, les systèmes satellites radar ont un potentiel d'acquisition d'images aux phases actives d'une crue plus important que les systèmes satellites optiques passifs. C'est pourquoi, au regard de l'objectif d'exploitation des images satellitaires pour l'étude des inondations, il a été choisi de présenter les systèmes radar de façon plus détaillée.

2.2.1 Fonctionnement du satellite radar latéral à synthèse d'ouverture

Mesure radar et coefficient de retro-diffusion

Les capteurs satellites radar (Radio Detection And Ranging) sont dits actifs car ils acquièrent des images de la surface terrestre en émettant des impulsions de micro-ondes puis en mesurant les caractéristiques du signal rétro-diffusé - intensité et date de réception du signal rétro-diffusé - (CNES[@], 2000; Polidori, 1997). Les caractéristiques du signal rétro-diffusé sont ensuite comparées avec celles du signal émis. La relation fondamentale entre les caractéristiques du radar, la cible et le signal reçu est appelée l'équation du radar. Elle se décline comme suit (Ulaby et al., 1981) :

$$P_r = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} P_e \quad (2.1)$$

Dans l'équation (2.1), P_e et P_r désignent respectivement les puissances émise et reçue par l'antenne, G le gain de l'antenne, λ la longueur d'onde du signal, et σ la section équivalente de rétro-diffusion de la cible. Cette dernière est complexe au sens mathématique du terme :

$$\sigma = A e^{j\varphi} \quad (\text{avec } A \text{ l'amplitude et } \varphi \text{ la phase}) \quad (2.2)$$

Dans l'équation (2.2), σ est fonction des directions de l'onde incidente et de l'onde réfléchi vers l'antenne, mais aussi de la forme et des caractéristiques diélectriques de la cible. L'amplitude de σ correspond à la surface d'un réflecteur parfait plan, orienté face à l'antenne, qui réfléchirait un signal de même puissance P_r que la cible réelle. Sa phase correspond au déphasage entre l'onde émise et l'onde reçue par l'antenne.

Usuellement, la surface équivalente de rétro-diffusion est convertie en un coefficient de retro-diffusion σ^0 de la cible, défini comme le logarithme du rapport entre σ et une surface S de référence :

$$\sigma^0 = \log\left(\frac{\sigma}{S}\right) \quad (2.3)$$

Le principe d'acquisition du radar latéral

Les impulsions sont émises par l'antenne perpendiculairement à la trajectoire du porteur, en visée oblique, suivant un angle θ appelé angle de visée. Les réflecteurs, à la surface de la terre sont localisés grâce à leur distance à l'antenne qui est calculée à partir du temps d'aller retour de l'onde radar et de la vitesse de propagation des ondes radar dans l'atmosphère. La répétition des impulsions assure le balayage azimutal, i.e. dans la direction de déplacement de l'antenne.

2.2.2 Résolution spatiale et synthèse d'ouverture

Les systèmes radar, comme l'ensemble des satellites imageurs ont un pouvoir de discrimination spatiale limitée. Pour caractériser le pouvoir de discrimination du radar sur des objets à la surface de la Terre, deux résolutions sont définies (Henry, 2004). La résolution azimutale δ_{az} (Cf. Figure 2.6, p.42) caractérise le pouvoir de discrimination dans la direction de déplacement de l'antenne, et la résolution radiale δ_r (Cf. Figure 2.6) dans le plan perpendiculaire à la direction de déplacement de l'antenne (Polidori, 1997). Ainsi, deux objets situés sur une parallèle à la direction de déplacement de l'antenne ne pourront être discriminés que si la distance qui les sépare est supérieure à la résolution azimutale. De même, deux objets situés dans un plan perpendiculaire à la direction de déplacement de l'antenne ne pourront être discriminés que si la distance qui les sépare, dans le plan horizontal, est supérieure à la résolution radiale.

La résolution azimutale est proportionnelle à l'ouverture angulaire du lobe de l'antenne (rapport de la longueur d'onde λ du signal émis par la longueur D de l'antenne) le long de sa trajectoire (Figure 2.6, p.42). Par conséquent, une résolution azimutale fine exige une grande taille d'antenne.

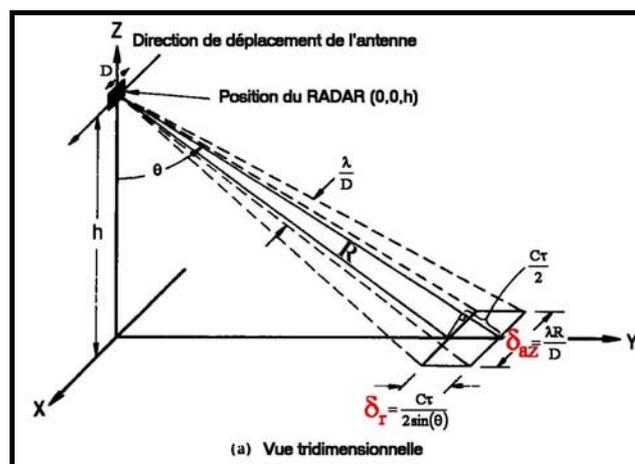


Figure 2.6 : Radar latéral et résolution spatiales (adapté de (Ulaby et al., 1982))

La résolution radiale est quant à elle imposée par la durée des impulsions. En effet, pour que deux réflecteurs proches puissent être discernés, il faut que les signaux qu'ils réfléchissent vers les satellites

soient disjoints temporellement. En conséquence, une résolution radiale fine impose une durée d'impulsion très petite, ce qui implique l'emploi d'une puissance d'émission importante.

Pour éviter l'emploi d'antennes très grandes et très puissantes, deux méthodes sont employées dans les techniques satellitaires radar actuelles : la synthèse d'ouverture et la compression d'impulsion.

Amélioration de la résolution spatiale

Pour améliorer la résolution radiale, la solution retenue dans la compression d'impulsion est l'émission d'une onde fortement modulée en fréquence. Cette modulation permet d'éclairer simultanément deux réflecteurs voisins avec des signaux de fréquences différentes, et donc les discriminer. Le signal reçu est mis en corrélation avec un signal de référence appelé réplique, identique au signal émis mais décalé dans le temps (Polidori, 1997). Le pic d'auto-corrélation est obtenu au temps t_0 correspondant au temps de propagation aller-retour de l'onde. La résolution radiale est alors déterminée à partir de la largeur du pic d'auto-corrélation à -3dB. Ce traitement, appelé « filtre adapté » a la particularité d'augmenter l'intensité du signal par rapport au bruit.

Pour améliorer la résolution azimutale, la synthèse d'ouverture est possible grâce à l'effet Doppler, i.e. la variation de la fréquence du signal renvoyé par un élément ponctuel au cours du déplacement du radar : quand le point est devant le satellite, la fréquence du signal rétro-diffusé est supérieure à f_0 , et inversement quand le point est derrière le radar, elle est inférieure à f_0 . Cela implique que la fréquence Doppler est responsable d'une modulation en fréquence du signal radar. La compression d'impulsion peut donc être appliquée de la même façon que pour la résolution radiale.

Échantillonnage spatial des images radar

L'information présente sur chaque pixel d'une image radar résulte d'une intégration de la rétrodiffusion sur la surface du pixel. A l'issue de cette intégration, une image complexe (au sens mathématique du terme) est obtenue : une information d'amplitude et de phase est connue pour chaque pixel. Le passage à une image en amplitude (valeur réelle, au sens mathématique du terme) est appelé détection (Polidori, 1997). D'après le théorème d'échantillonnage de Shannon-Nyquist, cette opération nécessite de doubler la fréquence d'échantillonnage sur l'image en amplitude par rapport à l'image complexe. En conséquence, sur une image en amplitude, la taille du pixel est égale à la moitié de la résolution spatiale de l'image complexe.

Selon les caractéristiques d'acquisition et le niveau de pré-traitement des images analysées, la taille du pixel peut être variable. Par exemple, dans le cas des images RADARSAT en amplitude, en mode d'acquisition Standard Beam (resp. Fine Beam) la taille du pixel est de 12,5m (resp. 6.25m) en niveau de prétraitement SMI - Systematic Map Image -, alors qu'elle est de 8m (resp. 3.125m) en niveau de prétraitement PIP – Path Image Plus (RADARSAT, 2000).

NB : Pour les images en amplitude un soin important doit être apporté à **ne pas confondre la taille du pixel** (résultat de l'échantillonnage de l'information suivant le théorème de Shannon-Nyquist) avec la **résolution spatiale** (pouvoir de séparation d'objets voisins). Pour éviter toute ambiguïté, cette dernière sera nommée « **Résolution Spatiale Effective** » (RSE) dans la suite du document.

2.2.3 Radiométrie sur les images radar

Échantillonnage et calibration radiométriques des images radar

Sur les images satellitaires radar, l'information présente pour chaque pixel, n'est pas directement la rétrodiffusion radar σ^0 , mais une information discrète appelée compte numérique. Pour estimer les coefficients de rétro-diffusion à partir des comptes numériques, plusieurs relations peuvent être employées. Ces relations, propres à chaque capteur, utilisent des constantes de calibration du système radar (Small et al., 1997). Généralement, ces dernières sont fournies dans le fichier d'en-tête de l'image.

Par exemple, dans le cas de RADARSAT1, le RSI – RadarSat International - propose la relation suivante pour le $j^{\text{ème}}$ pixel d'une ligne de l'image radar (RSI, 2000):

$$\sigma_j^0 = 10 \cdot \log \left[\frac{(CN_j + A3)}{A2_j} \right] + 10 \cdot \log [\sin(I_j)] \quad (2.4)$$

Où CN_j désigne le compte numérique du pixel, $A2_j$ (dépend de la position du pixel sur la ligne) et $A3$ les constantes de calibration, et I_j à l'angle d'incidence local au sol.

Le chatoisement (« Speckle »)

Les images radar sont soumises aux effets du chatoisement - aussi appelé scintillement, ou « speckle » en Anglais - (Fellah, 1997). Ce dernier est un bruit inhérent à tous les systèmes qui émettent des ondes cohérentes et se traduit sur les images par un aspect granulaire (Henry, 2004). Il est dû aux interférences aléatoires des ondes cohérentes émises par le radar sur une surface rugueuse. En effet chaque signal reçu en un point donné de l'antenne est la somme des rétro-diffusions d'un grand nombre de réflecteurs élémentaires (Saad & El Assad, 1985). Les ondes réfléchies par ces réflecteurs élémentaires interfèrent les unes avec les autres, ce qui diminue la cohérence spatiale du signal (Comblet, 2005) et est responsable d'une dégradation radiométrique sur les images. Les effets du chatoisement peuvent s'avérer préjudiciables pour l'analyse thématique fine des images radar. En effet, ils ajoutent une variabilité radiométrique sur les images qui perturbe l'identification des objets présents à la surface de la Terre, en particulier par la présence de valeurs de rétro-diffusion atypiques au sein de zones homogènes.

Pour caractériser le niveau de chatoisement sur une image radar, est défini un nombre de vues équivalent (ENL) qui traduit un nombre d'éclairéments moyen des cibles au sol par le radar. Plus la valeur d'ENL est forte plus le chatoisement est réduit. En supposant que chaque pixel d'une zone homogène (vis à vis du signal radar) soit affecté d'une réalisation indépendante du speckle, l'ENL peut être estimé, sur une zone homogène de l'image, par la formule suivante (Ulaby et al., 1982) :

$$ENL \sim \frac{1}{CV^2(I_{\text{surf_homogène}})} \quad (2.5)$$

(Avec $CV(I_{\text{surf_homogène}})$ le coefficient de variation de l'intensité sur une zone homogène de l'image)

Pour limiter les effets dus au chatoisement, deux méthodes de traitement des images radar sont fréquemment employées : le filtrage temporel et le filtrage spatial.

Le filtrage temporel

Le filtrage temporel peut être appliqué sur au moins deux images radar ayant des caractéristiques d'acquisition similaires (polarisation, angle d'incidence, orbite ascendante ou descendante) (Bruniquel & Lopes, 1997). Il repose sur l'hypothèse que le chatoiement est pleinement développé (Henry, 2004), ce qui signifie que les variations de réponse radiométrique d'un objet resté inchangé d'une image à l'autre ne sont dues qu'aux effets du chatoiement. Il existe différents types de filtres temporels, plus ou moins complexes, qui consistent la plupart du temps à calculer une moyenne pondérée pixel à pixel (ou sur une fenêtre glissante) des retro-diffusions sur l'ensemble des images disponibles. En particulier, pour une série temporelle de N images, (Bruniquel & Lopes, 1997) proposent un algorithme qui fournit N images filtrées en sortie :

$$\hat{z}_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j z_j \frac{E[z_i]}{E[z_j]}, \quad i = 1 \dots N \quad (2.6)$$

(Avec z_i la réflectivité radar sur l'image i , \hat{z}_i la valeur estimée avec réduction du chatoiement pour l'image i , E l'espérance mathématique, et α_j ($i=1 \dots N$) les coefficients de pondération). Dans (2.6), les coefficients de pondération sont optimisés afin de rendre minimale l'erreur quadratique moyenne pour chacune des images considérées. Cela permet de conserver l'information initiale contenue dans chacune des images. En d'autres termes, si l'image N_i initiale est localement différente des autres images (par exemple présence d'une zone inondée), cette zone singulière est conservée dans l'image N'_i filtrée.

Les filtres temporels permettent d'augmenter de façon importante l'ENL, s'ils sont toutefois appliqués sur un nombre suffisant d'images. De plus, lorsqu'ils sont appliqués pixel à pixel (et non sur une fenêtre glissante), ils ne dégradent pas la résolution spatiale initiale des images.

Le filtrage spatial

Le filtrage spatial s'applique sur une seule image radar. Les filtres spatiaux sont nombreux et plus ou moins complexes. Les filtres les plus simples - médian ou moyen - consistent à remplacer la valeur de retro-diffusion d'un pixel par la médiane ou la moyenne des rétro-diffusions dans un voisinage donné. La taille du voisinage est définie par la taille de la fenêtre glissante - en pixel - utilisée pour le filtrage. Des filtres plus évolués, dit adaptatifs, modifient la méthode de calcul selon les statistiques locales de rétro-diffusions dans un voisinage donné - fenêtre glissante - du pixel considéré (Jingfeng et al., 2003). Parmi ceux-ci, il est possible de citer les filtres adaptatifs de Lee (Lee, 1980), Frost (Frost et al., 1982), et Gamma MAP - Maximum A Posteriori - (Lopes et al., 1993; Lopes et al., 1990). Certaines publications proposent des études comparatives de ces différents types de filtres adaptatifs, par exemple (Mansourpour et al., 2006; Zhiyong et al., 2004).

Les filtres spatiaux, bien qu'efficaces pour réduire les effets du chatoiement, sont responsables d'une dégradation de la résolution spatiale des images, directement liée à la taille de la fenêtre glissante utilisée. Aussi, dans le cas où l'analyse des images nécessite une résolution spatiale la plus fine possible, l'emploi de ce type de filtre peut s'avérer non pertinent.

2.2.4 Les paramètres qui influencent la rétro-diffusion

Cette section du document présente les différents paramètres qui influencent la rétro-diffusion radar. Ceux-ci comprennent d'une part les caractéristiques morphologiques et physiques des objets observés, et d'autre part les caractéristiques du signal émis (Ulaby et al., 1986). Pour plus de clarté, chacun de ces paramètres sera présenté dans un paragraphe distinct, avec l'hypothèse implicite que les autres paramètres sont invariants. Il semble en conséquence important de garder à l'esprit que leurs effets sur la rétrodiffusion sont combinés dans la réalité.

2.2.4.1 La rugosité de surface

De façon générique, trois grandes classes de réflecteurs du signal radar peuvent être définies à la surface de la Terre : les réflecteurs spéculaires (lisses), les réflecteurs rugueux (diffus), et les réflecteurs en coin (Figure 2.7).

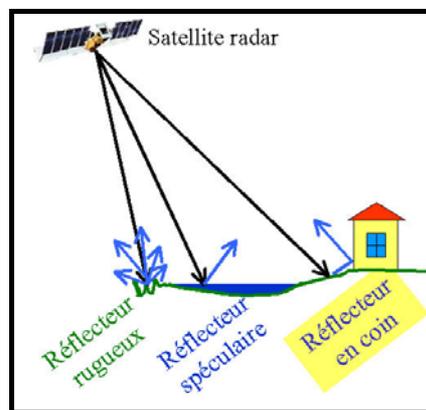


Figure 2.7 : Illustration de l'influence de la rugosité sur la rétro-diffusion radar

En visée latérale, sur une surface lisse, se produit un effet spéculaire : la totalité du signal est réfléchi dans une direction divergente de l'antenne (Figure 2.7). Cela implique une rétrodiffusion en théorie nulle pour les étendues d'eau libre lisse.

Dans le cas d'un réflecteur rugueux (Figure 2.7), une part plus ou moins importante du signal émis par l'antenne est réfléchi vers celle-ci. Plus la surface du réflecteur est rugueuse, plus le signal rétrodiffusé sera important. Le caractère rugueux ou lisse d'une surface est en particulier défini par les critères de Rayleigh et de Fraunhofer en liaison avec la longueur d'onde du signal incident. D'après ces critères, une surface est lisse vis à vis du signal incident si :

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (\text{critère de Rayleigh}) \quad (2.7)$$

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{32 \cos \theta} \quad (\text{critère de Fraunhofer}) \quad (2.8)$$

Dans les relations (2.7) et (2.8), σ_h est l'écart type de hauteur de la cible, λ la longueur d'onde du signal et θ l'angle d'incidence). Le critère de Fraunhofer, plus contraignant, s'avère parfois plus cohérent avec des essais expérimentaux et plus approprié pour modéliser la diffusion sur une surface naturelle (Ulaby et al., 1982). Dans le cadre de la détection des étendues inondées sur les images radar,

le vent, les courants ou de fortes précipitations peuvent être à l'origine d'une rugosité des surfaces d'eau libre qui tend à rapprocher leur réponse radiométrique de celle de réflecteurs rugueux et les rendre plus difficilement détectables sur les images. Les vaguelettes auront des effets différents sur les images selon leur taille et la longueur d'onde du signal radar.

Dans le cas de réflecteurs en coin, par exemple des bâtiments, des effets de réflexions multiples entre le sol et ces réflecteurs engendrent des valeurs fortes de rétro-diffusion (Figure 2.7, p.46). En présence d'inondation sous couvert végétal, des réflexions multiples entre la surface de l'eau et les troncs peuvent avoir lieu si la longueur d'onde du signal radar lui permet de traverser le couvert végétal. Le résultat est un signal rétrodiffusé par la végétation plus important qu'en absence de l'inondation.

2.2.4.2 Les caractéristiques diélectriques de la cible

Le coefficient de rétro-diffusion est lié aux caractéristiques diélectriques de la cible (Aires et al., 2005; CNES[®], 2000). Ces caractéristiques diélectriques sont souvent exprimées par la constante diélectrique complexe, qui traduit le caractère conducteur et réflectif d'un milieu, dans un domaine donné du spectre électromagnétique. Plus la constante diélectrique de la cible observée est forte dans le domaine des micro-ondes, plus celle-ci sera réflective au signal radar. Il en découle qu'à caractéristiques d'acquisition et rugosité invariantes, une augmentation de la constante diélectrique d'une cible entraîne une augmentation de sa rétro-diffusion.

Dans le domaine des micro-ondes, pour la plupart des milieux naturels secs, les constantes diélectriques rencontrées sont de l'ordre de 3 à 8, alors que celle de l'eau est de l'ordre de 80. En conséquence, une augmentation de la teneur en eau d'une cible, par exemple d'un sol entraîne un accroissement de la rétro-diffusion.

2.2.4.3 La longueur d'onde

Les systèmes radar émettent des signaux dans les micro-ondes, qui incluent des longueurs d'ondes comprises entre 1mm et 1m. Dans le domaine des micro-ondes, le spectre électromagnétique est découpé en plusieurs bandes spectrales désignées par des lettres majuscules (Tableau 2.2). La plupart des satellites radar imageurs utilisent des signaux en bande X, C ou L.

Lettre de désignation de la bande spectrale	Bande de longueur d'onde (cm)	Bande de fréquence (GHz)
Ka	0,83 - 1,36	22 - 36
Ku	1,36 - 2,7	10,9 - 22
X	2,7 - 5,2	5,75 - 10,9
C	5,2 - 7,1	4,2 - 5,75
S	7,1 - 19,3	1,55 - 4,2
L	19,3 - 76,9	0,39 - 1,55
P	76,9 - 133	0,225 - 0,39

Tableau 2.2 : Bandes spectrales radar - fréquences et longueurs d'ondes associées.

Selon la longueur d'onde du signal émis, la transparence de l'atmosphère vis à vis du signal radar est plus ou moins marquée (Henry, 2004). Dans le cas des satellites radar imageurs, pour les bandes X, C et L, la transparence à l'atmosphère est assez bien marquée.

La sensibilité du radar à la rugosité de surface varie avec la longueur d'onde du signal (Figure 2.8, p.48).

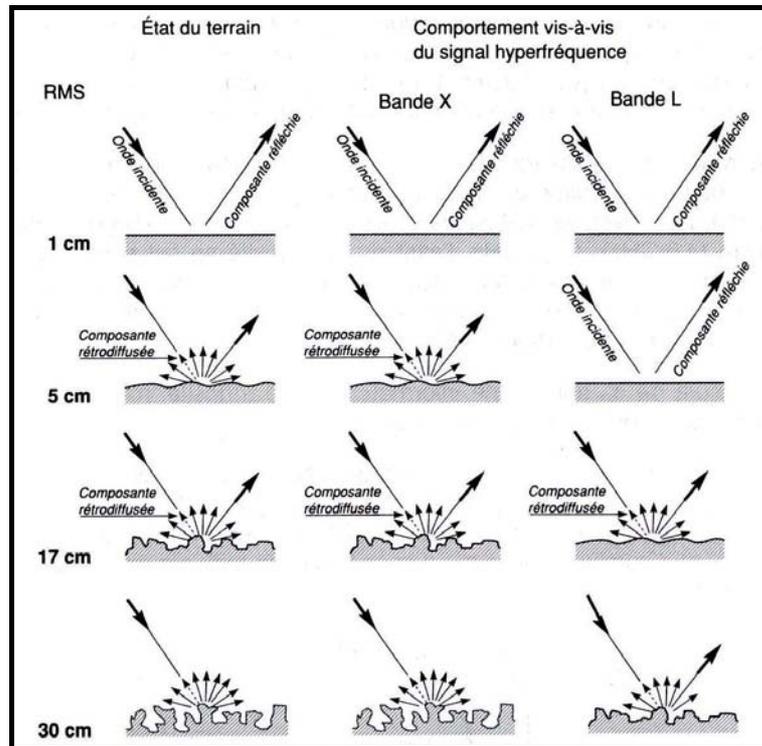


Figure 2.8 : Illustration de l'influence de la longueur d'onde sur la sensibilité du radar à la rugosité de surface pour les bandes X et L (Girard & Girard, 1999).

En effet, le caractère rugueux d'une surface dépend de la bande spectrale avec laquelle elle est éclairée. Ceci est directement lié à la notion de rugosité de surface telle qu'elle est définie par les critères de Rayleigh ou de Fraunhofer - relations (2.7) et (2.8). En conséquence, pour une surface rugueuse invariante, éclairée d'un point donné de l'espace, le signal rétro-diffusé est d'autant plus important que la longueur d'onde du signal est petite.

2.2.4.4 La polarisation

Pour les satellites radar, la polarisation est caractérisée par deux lettres. La première désigne la polarisation suivant laquelle l'onde est émise, et la seconde la direction dans laquelle l'antenne mesure l'onde rétro-diffusée. Pour l'émission ou la réception, la lettre H désigne une polarisation horizontale et la lettre V une polarisation verticale (e.g. : HH, onde émise polarisée horizontalement, et mesure de l'onde réfléchie suivant la direction horizontale).

Une polarisation VV implique une sensibilité du radar aux objets verticaux plus marquée (ESA, 2000). Au contraire en polarisation HH, les objets verticaux sont plus transparents vis à vis du signal radar (Figure 2.9, p.49).

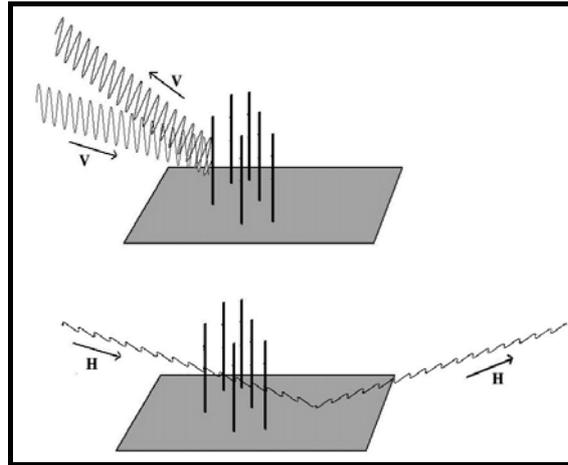


Figure 2.9 : Influence des objets verticaux sur le signal radar selon la polarisation

Par ailleurs, les satellites radar les plus récents fonctionnent avec plusieurs polarisations simultanées, en particulier en polarisation croisée (HV et VH) : capteurs multi-polarisations (e.g. : Envisat, satellite radar de l'ESA) (Cf. § 2.2.6).

2.2.4.5 L'angle d'incidence

Dans la géométrie d'acquisition des satellites imageurs, on définit un angle de visée et un angle d'incidence. L'angle de visée correspond à l'angle entre la verticale au droit de l'antenne (Nadir) et la direction antenne-cible. L'angle d'incidence correspond à l'angle entre la direction antenne-cible et la normale au sol au niveau de la cible. La normale est le vecteur perpendiculaire au sol. Elle dépend de la pente locale et l'azimut du terrain naturel. La pente représente l'inclinaison du terrain naturel dans un plan vertical. L'azimut traduit l'orientation du terrain naturel dans le plan horizontal.

Le phénomène de rétro-diffusion n'est généralement pas isotrope (Polidori, 1997). Par conséquent, selon l'angle d'incidence de l'onde radar, la rétro-diffusion d'un même objet ne sera pas identique. Sur la Figure 2.10, (Ulaby & Dobson, 1989) proposent des courbes de comportement général de la rétro-diffusion d'un revêtement assez lisse en fonction de l'angle d'incidence et selon la polarisation.

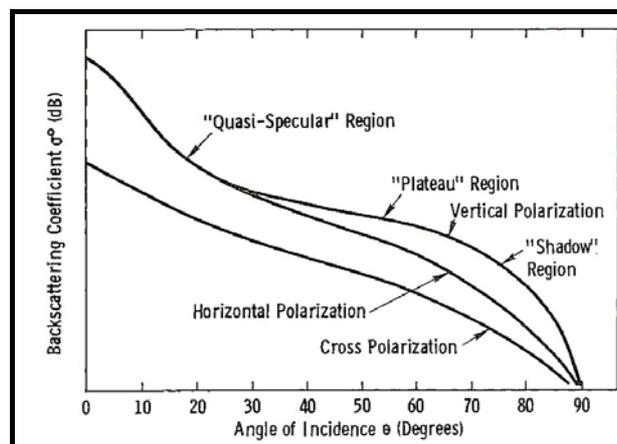


Figure 2.10 : Comportement général de la rétro-diffusion radar en fonction de l'angle d'incidence (Ulaby & Dobson, 1989)

2.2.5 Morphologie du terrain et image radar : les distorsions géométriques

En raison de l'acquisition en géométrie oblique, les radar imageurs sont soumis à des distorsions géométriques et une vision erronées du relief, provenant principalement du fait que le radar mesure des distances entre les cibles relativement à sa position dans l'espace et non des distances horizontales au sol (Holah, 2005). Étant donné que l'objet d'étude de la thèse concerne les étendues inondées en plaine, les distorsions sur les images étudiées seront relativement limitées. En conséquence, la présentation des distorsions sur les images dans cette section est relativement succincte. Pour plus de détail, on pourra se référer à l'ouvrage de (Polidori, 1997).

Les distorsions dues à la visée oblique

En vision oblique, dans le plan image du radar, une même cible est vue plus petite si elle est plus proche du nadir en raison d'un angle d'incidence plus faible (Figure 2.11). De la même façon, les distances entre les objets sont « raccourcies » dans le plan image en se rapprochant du nadir.

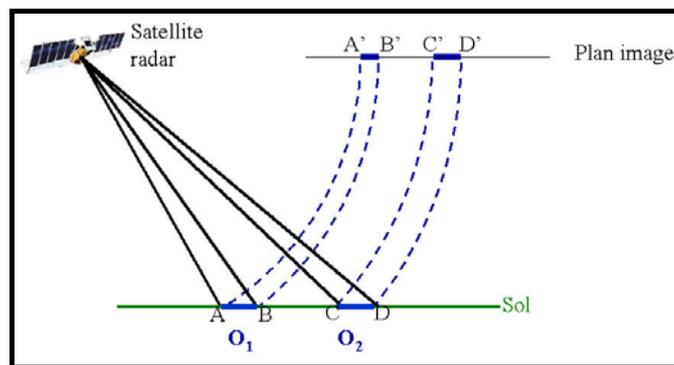


Figure 2.11 : Visée oblique et distorsion géométrique.

Repliement du relief

Par ailleurs, la visée oblique implique une vision erronée des versants du terrain naturel. En effet, un même versant du terrain naturel est vu plus court s'il est orienté vers l'antenne que s'il est orienté dans une direction opposée à l'antenne (Figure 2.12A). Ce phénomène est appelé rapprochement du relief (« forshortening » en anglais). De plus, sur la Figure 2.12A, le versant B-C est moins « éclairé » par le signal radar incident que le versant A-B et apparaît donc plus sombre sur l'image. Ce phénomène est appelé pseudo-ombrage.

Lorsque la pente du versant est supérieure à l'angle de visée (Figure 2.12B), le sommet B du versant est atteint par l'onde radar incidente avant la base A. Il y a donc inversion des positions du sommet B' et de la base A' du versant A-B dans le plan image. De plus, le point C n'est pas éclairé par l'onde incidente et n'est donc pas représenté dans le plan image. On parle alors de recouvrement pour le versant A-B (« layover » en Anglais) et d'ombrage pour le versant B-C (Figure 2.12B).

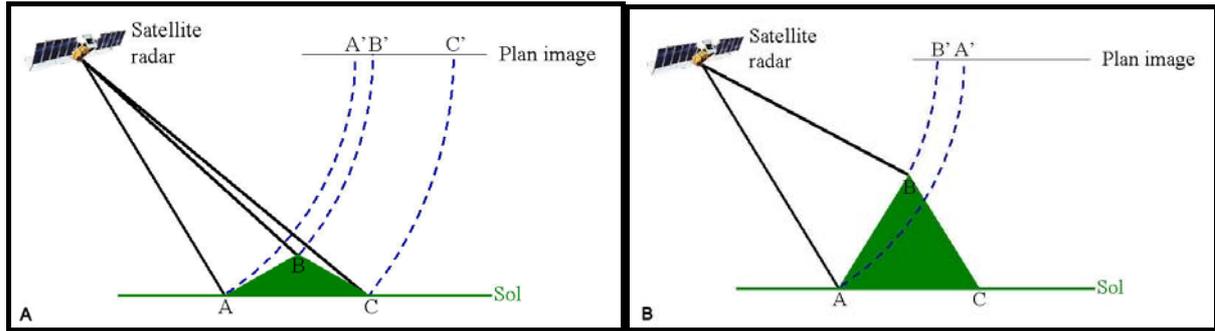


Figure 2.12 : A. Rapprochement du relief et pseudo-ombrage, B. Recouvrement et ombrage.

Étant donné les distorsions géométriques présentées précédemment, pour retrouver la géométrie initiale du terrain à partir des positions des objets dans le plan image, il est nécessaire d'avoir recours à certains pré-traitements.

Correction des distorsions géométriques sur les images

Le processus de correction des effets géométriques dus au relief et à la visée oblique est appelé orthorectification. L'orthorectification d'une image radar nécessite la connaissance d'une part des paramètres d'acquisition du capteur (vitesse de déplacement de l'antenne, angle de visée, géométrie du faisceau émis) et d'autre part de la géométrie locale du terrain (pente et azimut). Les caractéristiques d'acquisition sont la plupart du temps présentes dans les fichiers d'en-tête fournis avec les images. La géométrie locale du terrain peut quant à elle être connue grâce à des données topographiques telles qu'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La connaissance des caractéristiques d'acquisition et de la morphologie du terrain naturel permet ainsi de déterminer la correspondance entre coordonnées géographiques et coordonnées image.

Par ailleurs, le processus d'orthorectification peut être remplacé, en zone de relief limité, par un processus de géoréférencement par saisie de points d'amer (Small et al., 1997). Ce dernier consiste à calculer la position des pixels de l'image radar, dans un système de projection donné (e.g. : projection Lambert I, II, III ou IV pour la France). Les points d'amer sont des objets de la surface du sol qu'il est possible d'identifier à la fois sur l'image radar et sur une autre source de données géoréférencée, par exemple une carte IGN. Après saisie de ces points, par transformation géométrique de l'image, il est possible de recalculer des coordonnées géographiques pour l'ensemble des objets de l'image radar.

2.2.6 Les principaux satellites radar imageurs

Le Tableau 2.3 (p.52) présente les principaux satellites RSO actuels, anciens et futurs.

Nom	Origine	Année de lancement	Bande spectrale	Polarisation	Angle de visée (°)	Fauchée (km)	Résolution spatiale (m)	Période de revisite (j)
SEASAT	USA-Japon	1978	L (23,5cm)	HH	~20	100	~25	-
Almaz	Russie	1991	S (9,6cm)	HH	30-60	25-300	10-15	-
JERS-1	Japon	1992	L (24cm)	HH	~35	75	~18	-
ALOS		2006	L (23,5cm)	HH-HV-VH-VV	8-60	40-350	7-100	46
ERS-1 et 2	Europe	1991 et 1995	C (5,6cm)	VV	~23	100	~25	3-35
ENVISAT (ASAR)		2002	C (5,6cm)	HH-HV-VH-VV	15-45	56-400	30-2000	3-23
RADARSAT-1	Canada	1995	C (5,6cm)	HH	10-59	50-500	10 - 100	3-24
RADARSAT-2		2007	C (5,5 cm)	HH-HV-VH-VV	20-50	20-100	3-100	3-24
TerraSAR (2 satellites)	Allemagne-Europe	2006	X (3cm)	HH-HV-VH-VV	15-60	5-100	1-100	2,5-11
		-	L	HH-HV-VH-VV	20-45	20-200	5-50	14
COSMO-SKYMED (4 satellites)	Italie-Europe	2007	X (3,1cm)	HH-HV-VH-VV	20-60	10-100	1-100	0.125-10

Tableau 2.3 : Principaux satellites RSO actuels, anciens (en italique) et futurs (en gras).

2.2.7 La réponse de l'eau sur les images radar

2.2.7.1 Réponse de l'eau libre

Avec l'hypothèse que les surfaces en eau ont une rugosité très faible, celles-ci se comportent comme des réflecteurs spéculaires, c'est à dire que le signal émis par le satellite est réfléchi par l'eau dans une direction divergente de celui-ci. Par conséquent, les surfaces en eau, lisses, apparaissent avec des valeurs de rétro-diffusion très faibles sur les images (Henry, 2004). Une valeur par excès de la rétro-diffusion de l'eau sur une image radar peut être par exemple de l'ordre de -15dB, en bande L, en absence de vent (Horritt et al., 2003).

Cependant, en présence de vent ou de fortes précipitations, les vaguelettes qui se forment à la surface de l'eau créent une rugosité de surface qui peut accroître la valeur du signal rétro-diffusé (Badji & Dautrebande, 1997). La Figure 2.13 présente la comparaison des évolutions théoriques et mesurées du coefficient de rétrodiffusion de l'océan en fonction de la vitesse du vent pour différents angles d'incidences, en bande X.

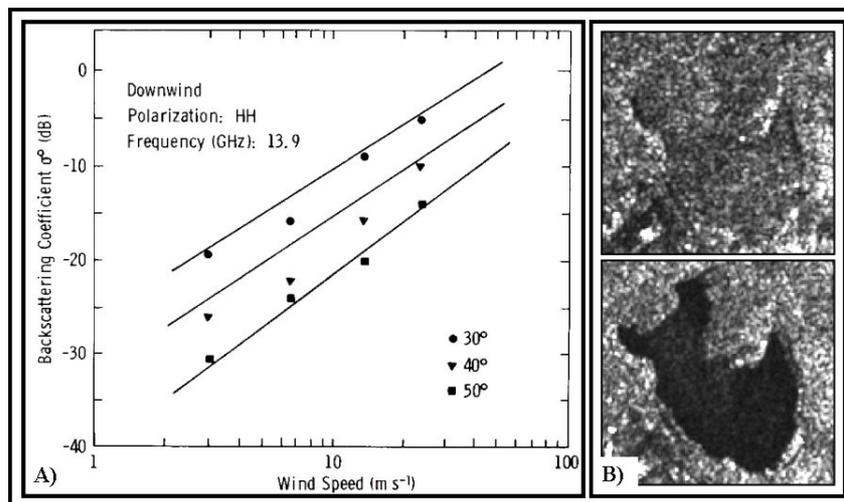


Figure 2.13 A et B : Influence du vent sur la rétrodiffusion de l'eau libre.

A : Dépendance entre la rétro-diffusion en bande X d'étendues océaniques théorique (lignes) et observée (points) et la vitesse du vent (Moore & Fung, 1979).

B : Extraits d'images RADARSAT (retenue d'eau de la centrale EDF de Cattenom) en bande C dont l'une est soumise à des effets importants du vent (en haut à droite) et l'autre non (en bas à droite).

La faible valeur de rétrodiffusion de l'eau, en absence d'effets dus au vent, est fréquemment utilisée pour la détection des étendues inondées sur les images radar. En effet, en raison des effets de réflexion spéculaire sur l'eau et non sur les autres objets, l'eau apparaît plus sombre que le reste sur les images. Cet effet est d'autant plus marqué que l'humidité des sols augmente leur rétrodiffusion, permettant une distinction plus aisée entre l'eau libre et les sols humides en limites d'inondation.

En illustration, la Figure 2.14 et la Figure 2.15 présentent les ordres de grandeur et les statistiques des coefficients de rétro-diffusion de quelques occupations du sol rencontrées à la surface de la Terre, et en particulier de l'eau libre.

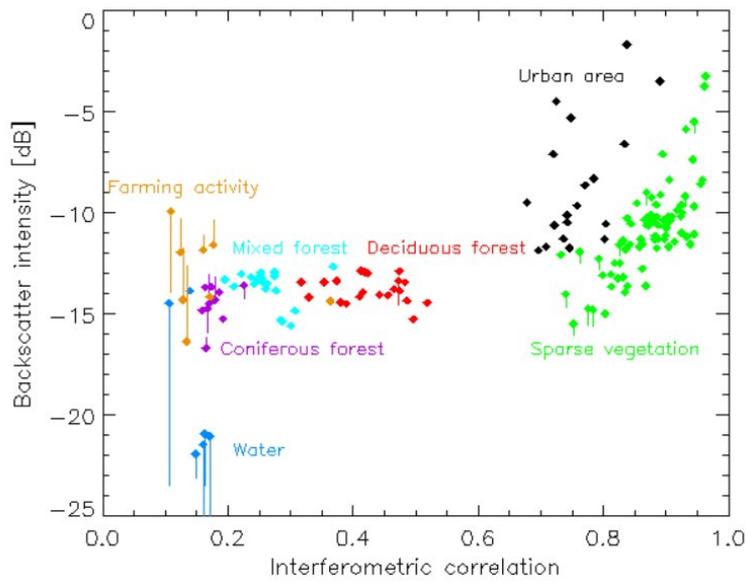


Figure 2.14 : Lien entre coefficients de rétro-diffusion et coefficients de corrélation interférométrique mesurés pour quelques occupations du sol (Borgeaud & Wegmueller, 1996)

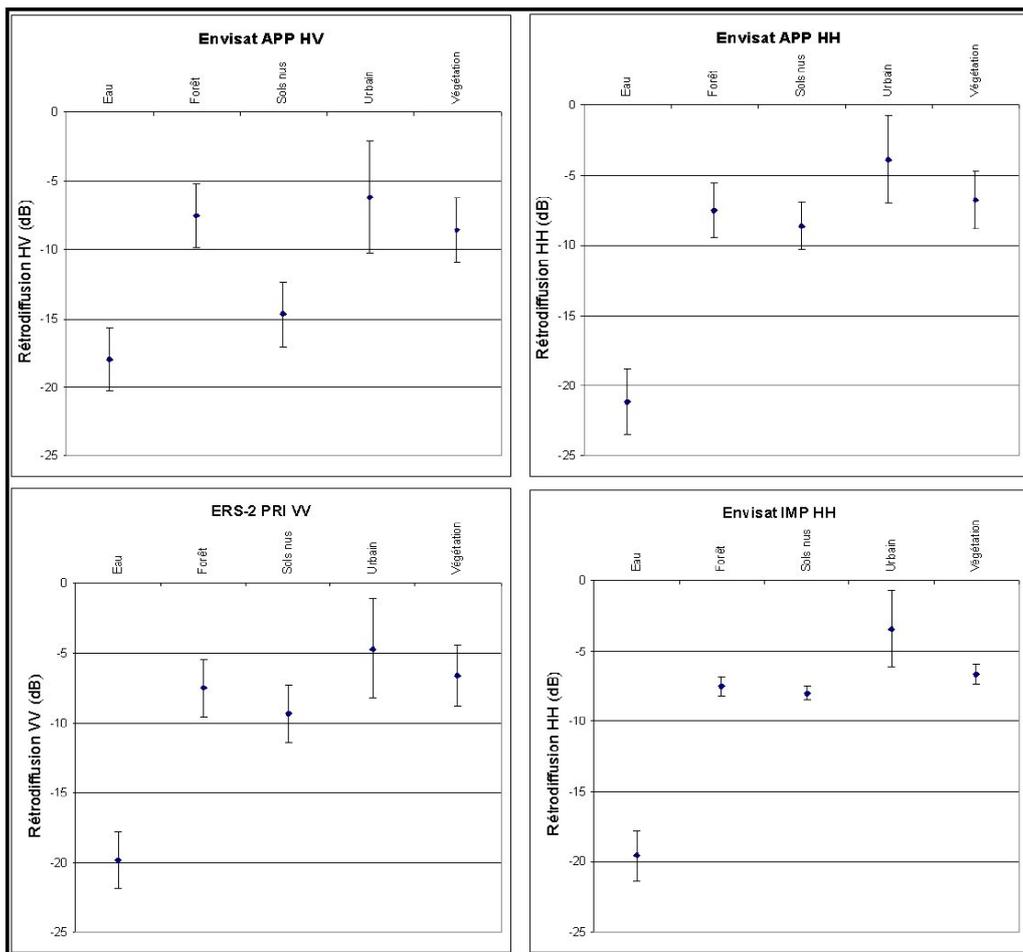


Figure 2.15 : Coefficients de rétrodiffusion moyens et écart type obtenus avec des données ENVISAT ASA-APP et ASA IMP et ERS2-PRI (Henry, 2004).

La Figure 2.14 (p.54) présente des résultats obtenus par (Borgeaud & Wegmueller, 1996) concernant les rétro-diffusions radar de différentes occupations du sol, avec des images du satellite ERS-1. Cette figure a pour avantage de fournir des ordres de grandeur de valeur de rétrodiffusion de différentes occupations du sol pour une acquisition en bande C, en polarisation VV, avec des angles d'incidences compris entre 29 et 35°.

La Figure 2.15 (p.54) présente les statistiques des rétrodiffusions pseudo-calibrées (valeur moyenne de la forêt imposée à -7,5dB) obtenues pour différentes images (différentes polarisations et différents niveaux de prétraitement) et différentes occupations du sol (Henry, 2004).

Selon la polarisation du radar, la distinction radiométrique de l'eau par rapport aux autres éléments de l'image est plus ou moins marquée (Henry, 2004). Sur la Figure 2.16, on constate que la différence de valeur de compte numérique est beaucoup plus marquée pour la polarisation HH que pour les autres. Cela est en particulier dû au fait que la polarisation VV est plus sensible aux objets verticaux tels que les vaguelettes générées par le vent et la végétation. D'autre part, en polarisation croisée, la rétrodiffusion de l'eau libre se distingue moins de celle des autres éléments, en particulier à cause de la faible dynamique radiométrique (Henry, 2004).

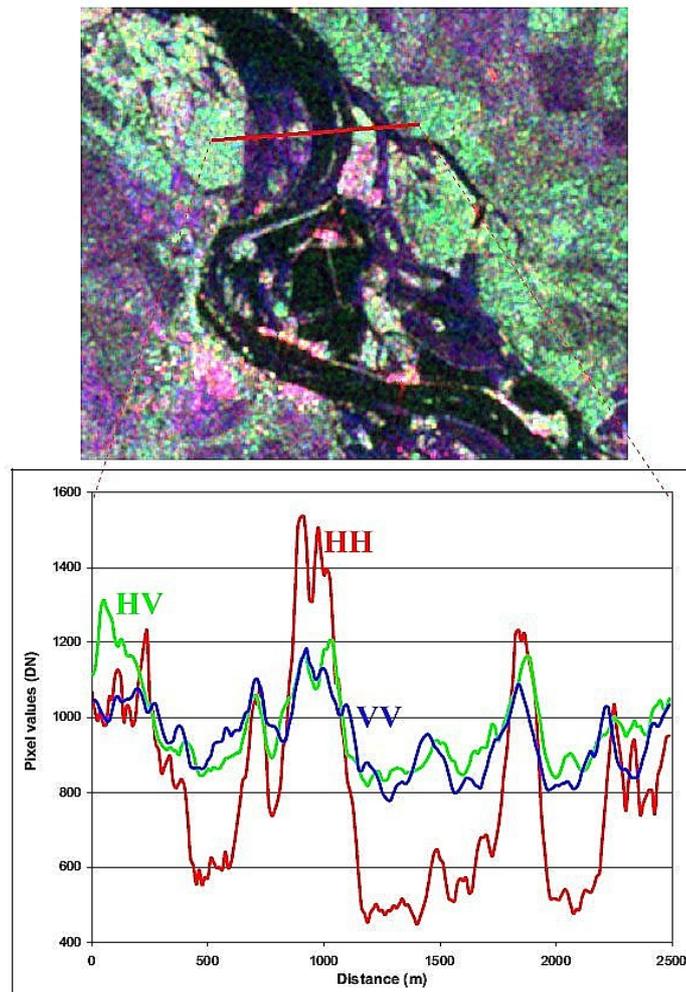


Figure 2.16 : Profils radiométriques sur une image composée multipolarisation HH-HV-VV (HH en rouge, HV en vert et VV en bleu) (Henry, 2004)

Une analyse combinant différents types de polarisation peut permettre de tirer parti des avantages de chaque polarisation et de lever parfois certains doutes concernant la présence ou l'absence d'eau libre sur les images (Henry, 2004).

2.2.7.2 Réponse de l'eau sous végétation haute

Sous couvert végétal, l'eau est masquée et la plupart du temps difficilement discernable. Toutefois, il est dans certains cas possible de la détecter sur les images radar (Hess et al., 1990). En effet, si la longueur d'onde du signal émise par le radar est suffisamment grande, le signal a la capacité de traverser la canopée. En conséquence, la présence d'eau sous les arbres engendre des réflexions multiples du signal qui tend à accroître la rétro-diffusion. En effet, en présence d'eau sous couvert végétal, le signal émis par le RSO est réfléchi par le couvert végétal, mais aussi - par double réflexion - par la surface d'eau libre et le tronc des arbres. D'après (Ulaby et al., 1996), la bande L est plus adaptée que la bande C à pénétrer le couvert végétal (Figure 2.17) et mettre ainsi en évidence la présence d'eau. De même avec des angles d'incidence plus faibles, l'influence du couvert végétal s'avère moins importante, facilitant de ce fait la détection de l'eau (Töyrä et al., 2001).

Des travaux concernant la cartographie de zone inondée sous végétation à partir d'imagerie radar aéroportée ont été effectués par Horritt (Horritt et al., 2003). Ils ont permis de mettre en évidence une augmentation de rétro-diffusion pour la végétation inondée d'environ 1,2dB en bande C, avec une polarisation VV, et une différence de phase d'environ 180° entre les polarisations HH et VV en bande L.

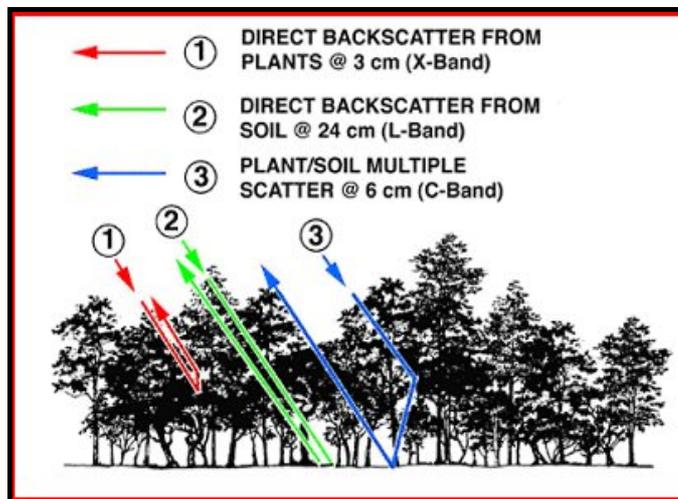


Figure 2.17 : Illustration de la capacité de pénétration du couvert végétal par le signal radar en fonction de la longueur d'onde (ITC®)

Chapitre 3.

Apports des images satellitaires pour la gestion des inondations

Sommaire

3.1	Caractérisation spatiale en deux dimensions d'inondations à partir d'images satellitaires	58
3.1.1	Grands projets exploitants des images satellitaires pour la gestion des inondations	58
3.1.2	Cartographie d'inondation : aléa, vulnérabilité et impact	60
3.1.3	Suivi temporel des crues et détection autonome	61
3.1.4	Cartographie des extensions maximales de crue	64
3.1.5	Techniques de traitement d'images couramment employées pour la cartographie d'inondations	64
3.2	Estimation de niveaux d'eau et de débit par télédétection	66
3.2.1	Mesures altimétriques directes	66
3.2.2	Mesures par photogrammétrie et interférométrie radar	67
3.2.3	Mesures par mise en correspondance des surfaces inondées avec des données complémentaires	68
3.3	Utilisation des images satellitaires pour l'aide à la modélisation hydraulique	71
3.3.1	Incertitude et équifinalité	72
3.3.2	Intégration des données spatiales dans la modélisation hydraulique	73

Ce chapitre a pour objectif de présenter quelques études et résultats présents dans la bibliographie afin d'illustrer les principaux champs d'utilisation des images satellitaires pour la caractérisation spatiale des inondations et de replacer les travaux de thèse dans leur contexte scientifique. Celui-ci n'a pas la prétention de dépeindre l'ensemble des travaux utilisant les images satellitaires pour l'étude des inondations, mais d'illustrer diverses problématiques de recherche pour lesquelles l'utilisation des images satellitaires s'est avérée pertinente. Le principal champ d'application des images satellitaires pour l'étude des inondations reste à ce jour la cartographie d'étendues inondées. Les images radar sont plus fréquemment utilisées (de F. Costa et al., 1998). En effet, les satellites radar imageurs ont la capacité d'acquérir des images de même qualité de jour comme de nuit, quelles que soient les conditions de nébulosité, ce qui rend les images satellitaires radar de crue potentiellement plus disponibles, compte tenu du fait que les inondations sont la plupart du temps accompagnées d'un couvert nuageux important (Henry, 2004).

Ce chapitre est structuré en trois sections. La première s'intéresse à l'utilisation des images satellitaires de crue pour la caractérisation spatiale en deux dimensions des inondations, c'est à dire en particulier l'extraction des étendues inondées et des limites d'inondation. La seconde présente des études visant à estimer des niveaux et des débits à partir d'images de crues. La troisième s'intéresse aux études qui exploitent les images satellitaires de crue dans le cadre de la modélisation hydraulique des inondations.

3.1 Caractérisation spatiale en deux dimensions d'inondations à partir d'images satellitaires

Les images satellitaires de crues sont très pertinentes pour l'étude et l'aide à la gestion des inondations (Gumley & King, 1995; Guo, 2000; Moore & North, 1974), non seulement en terme d'aide à la prévention et la prévision mais aussi en contexte opérationnel (Blyth, 1997). Pour illustrer l'intérêt croissant porté aux images satellitaires dans la gestion des inondations, la première section du paragraphe 3.1 présente quelques grands projets qui se sont intéressés aux apports des images satellitaires pour la gestion des inondations.

3.1.1 Grands projets exploitants des images satellitaires pour la gestion des inondations

Le projet NOAH

Coordonné dès ses débuts par le Cemagref en 1997, le projet NOAH a inclus 6 partenaires européens : undesanstalt für Gewässerkunde (Allemagne), Delft Hydraulics (Pays-bas), Spot Image (France), Egerie S.A. (Luxembourg), Istar (France) et l'International Commission on the Hydrology of the Rhine Basin. Son objectif a été d'améliorer les techniques et les outils de prévention du risque d'inondation grâce à l'intégration des données d'observation de la Terre (images satellitaires, modèles numériques de terrain et cartes d'occupation du sol) dans les modèles hydrauliques et hydrologiques (NOAH, 2000). Le site pilote du projet NOAH est le bassin de la Moselle car la diversité de son relief en fait un site largement représentatif des bassins européens. L'intérêt du projet NOAH a en particulier été de sensibiliser à l'utilisation des données spatiales les utilisateurs tels que les collectivités locales, les agences de l'eau et les décideurs. Il a d'autre part permis de construire un modèle numérique de terrain de l'ensemble du bassin versant de la Moselle, pouvant servir de base à l'ensemble des modèles hydrologiques des acteurs du projet.

Le programme PACTES

Initiative française lancée à la fin de l'an 2000 sous l'égide du CNES et du Ministère français de la Recherche, le programme PACTES (Prévision et Anticipation des Crues au moyen des TEchniques spatiales) a été dirigé vers les acteurs opérationnels : services de sécurité civile, d'alertes aux inondations et d'aménagement des sols. Il visait la mise en place d'une approche commune entre les acteurs, la science et l'industrie afin d'améliorer la prévision et l'anticipation des inondations (Puech et al., 2002). Les trois objectifs principaux de ce projet ont été de 1) participer à l'amélioration du service public dans le domaine de la gestion des risques, de la prévention à l'intervention, 2) accélérer la mise en pratique opérationnelle des résultats de la recherche, et 3) évaluer l'intérêt de l'utilisation des techniques spatiales pour la gestion du risque d'inondation. L'idée générale du projet a été de coupler la télédétection spatiale et des données exogènes dont l'intérêt pour la gestion des inondations est avéré à des modèles hydrologiques, météorologiques et hydrauliques afin d'analyser et anticiper les inondations.

Bien qu'il n'ait pas à proprement parler permis une appropriation de méthodes et de produits issus de la recherche par les acteurs opérationnels de la prévision et de la prévention, le projet PACTES a permis de montrer l'intérêt certain des données d'observation de la Terre pour l'aide à la prévision des inondations.

Il a par ailleurs donné naissance à d'autres projets, dont un projet R&T - Recherche et Technologie -, financé par le CNES mettant en collaboration l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) et plusieurs équipes du Cemagref et visant à montrer l'apport des données d'observation de la Terre pour l'étude des " Chemins de l'eau " et leur introduction dans l'analyse des inondations (Puech et al., 2004). La thèse présentée dans ce document a été en partie financée dans le cadre de ce projet.

Le projet DRAGON

Le projet dragon est le prolongement d'une collaboration durant la dernière décennie entre l'ESA et le NRSCC (Centre chinois de télédétection) pour le développement des applications de l'observation de la terre. Il a pris effet en 2004 et se terminera en 2007.

Les objectifs généraux du projet sont :

- promouvoir l'utilisation des images spatiales radar ERS et ENVISAT
- stimuler les échanges scientifiques et techniques entre des équipes de recherche européennes et chinoises
- fournir des avancées en terme d'algorithmes de traitement et de développement de produits à partir des données d'observation de la Terre de l'ESA pour des applications continentale, océaniques et atmosphériques.

Une partie du projet concerne les applications d'images ERS et ENVISAT pour la cartographie et la prévention des inondations (Andreoli & Yésou, 2005; Li et al., 2005; Xu et al., 2005).

La charte internationale « Espace et catastrophes majeures »

Elle a été fondée en juillet 1999 par les agences spatiales européenne ESA et française CNES suite à la conférence UNISPACE III à Vienne. A ce jour, beaucoup d'autres agences spatiales s'y sont jointes. Cette charte a permis la mise en place d'un système uniformisé d'acquisition de données spatiales afin de délivrer aux utilisateurs autorisés, les données acquises en période de crise (catastrophes naturelles ou dues à l'activité humaine). Les utilisateurs autorisés sont des organismes de protection civile, de sauvetage, de défense ou de sécurité des pays des agences participantes. Grâce à cette charte, lorsque l'état de catastrophe majeure est déclaré, les satellites sont si possible dépointés pour que le nombre d'images acquises de la catastrophe soit plus important possible. Dans le cadre de la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures, le service de cartographie rapide du SERTIT (Strasbourg, <http://sertit.u-strasbg.fr/>) s'engage à fournir des cartes de catastrophes majeures (dont inondations) dans les quelques heures qui suivent la réception d'une image satellitaire. Pour illustrer la fréquence des actions charte pour les inondations, le Tableau 3.1 présente les actions chartes « inondation » pour la période juin 2005-avril 2006 pour lesquelles le service de cartographie rapide du SERTIT a été mis à contribution.

Avril 2006	Inondations en Europe Centrale
Septembre 2005	Inondations dans le sud de la France
Juillet 2005	Inondations en Roumanie - Siret
Juillet 2005	Inondations en Chine - Wuhzou
Juin 2005	Inondations en Bulgarie

Tableau 3.1 : Actions chartes « inondation » entre juin 2005 et avril 2006 pour lesquelles le service de cartographie rapide du SERTIT a été mis à contribution.

3.1.2 Cartographie d'inondation : aléa, vulnérabilité et impact

Ce paragraphe s'intéresse à la caractérisation de l'aléa, de la vulnérabilité et des impacts des inondations grâce aux images satellitaires.

Les images satellitaires fournissent une vision objective de champs d'inondation avec des emprises spatiales au sol importantes et une continuité sur de longs linéaires de cours d'eau (Ali & Qadir, 1989; Hudson & Colditz, 2003; Tholey et al., 1997; Tralli et al., 2005). Ces images sont très utiles et très efficaces pour déterminer les étendues inondées (Dhakal et al., 2002; Giacomelli et al., 1995; Hess et al., 1995; Jain et al., 2005; Jensen, 1999; Oberstadler et al., 1997; Townsend & Walsch, 1998; Wang et al., 2002; Williamson, 1974). Les travaux qui exploitent l'imagerie satellite pour la cartographie d'inondations sont relativement présents dans la littérature scientifique.

Dans les études basées sur l'analyse d'images optiques, les surfaces inondées estimées par télédétection sont cohérentes avec des observations in situ (Rango & Anderson, 1974). Cependant, des erreurs importantes sur l'estimation des surfaces inondées peuvent se produire lorsque la résolution est trop grossière par rapport aux dimensions des surfaces en eau observée (Imhoff et al., 1987), lorsque l'eau est masquée par le sursol (e.g. forêt) sur des surfaces importantes ou encore en présence de macrophytes flottants qui augmentent la radiométrie de l'eau dans le proche infrarouge (Smith, 1997).

Dans le cas des capteurs radar spatiaux, (Henry, 2004) s'est intéressé à l'influence de différentes caractéristiques des images sur la qualité de la cartographie des inondations. Concernant l'influence de la polarisation, il ressort de ses travaux qu'une utilisation combinée de plusieurs polarisations est plus efficace que l'utilisation d'une seule polarisation. Prise individuellement, la polarisation HH semble la plus efficace pour la cartographie d'étendues inondées car elle est moins sensible aux effets du vent et de la végétation basse partiellement émergée (Cf. §2.2.7.1). D'autre part, en imagerie radar, résolution spatiale et radiométrique sont intimement liée : une amélioration de l'une se fait forcément au détriment de l'autre (Henry, 2004). Une résolution spatiale grossière implique une meilleure résolution radiométrique - grâce à des effets dus au chatoiement restreints - et par conséquent une détection de l'eau plus facile mais une identification des limites de l'inondation beaucoup moins précise et des possibilités d'exploitation uniquement pour des crues de grandes ampleurs. En conséquence, bien que plus perturbée par les effets du chatoiement, une haute résolution spatiale permet d'obtenir une délimitation des étendues inondées plus précise.

De la même façon que sur les images optiques, la détection de l'eau est perturbée par la présence de végétation haute sur les images radar. Certaines études - e.g. (Horritt et al., 2003)- se sont intéressées à la détection de l'eau en zones forestières. Les résultats sont concluants, mais les méthodologies

développées ne sont pas généralisables à tous les satellites radar en raison de leur diversité de polarisations et de longueurs d'onde (Cf. §2.2.7.2).

Les images de crues sont de plus utilisées pour caractériser le risque et les impacts des crues (De Roo et al., 1999; Liu et al., 2002; Moussa & Laranier, 2004; Profeti & MacIntosh, 1997; Puech et al., 2003; Rao, 1994; Sharma et al., 1996; Wang et al., 2003; Zhou et al., 2002). Dans ces études, les images satellitaires acquises en période de crue sont utilisées pour délimiter les étendues inondées puis croisées avec d'autres sources de données par exemple d'occupation du sol afin de coupler la vision spatiale de l'aléa inondation à la notion d'enjeux (Clandillon & De Fraipont, 2000; Yésou et al., 2002; Zhou et al., 2002).

Par exemple, (Sanyal & Lu, 2005) utilisent des images satellitaires optiques (Landsat ETM) et RSO (ERS1) d'inondation pour estimer la vulnérabilité de villages isolés d'une plaine d'inondation en Inde. Dans cette étude, le choix est fait de caractériser la vulnérabilité d'un village au phénomène d'inondation par la présence de points hauts et la profondeur de submersion dans la plaine à proximité de ce village. En effet, la présence d'un point haut permet aux villageois de se réfugier, et diminue ainsi leur vulnérabilité. Par ailleurs, plus la hauteur de submersion à proximité d'un village est grande, plus les vitesses d'écoulement sont importantes, ce qui augmente les dégâts occasionnés par la crue. Dans cette étude, les images satellitaires (RSO et canal PIR et MIR de Landsat) sont exploitées pour cartographier d'une part l'étendue inondée et d'autre part les villages de la plaine épargnés mais encerclés par l'inondation. De plus, turbidité et profondeur d'eau étant liées (Islam M. D. M. & Sado K., 2000), l'image Landsat est utilisée pour caractériser de manière qualitative la turbidité et définir de grandes classes de profondeur d'eau. Ensuite, par analyse spatiale sous Système d'Information Géographiques (SIG) des différents facteurs qui caractérisent la vulnérabilité, chaque village peut être affecté d'un indicateur de vulnérabilité. L'inconvénient de ce type d'étude est de ne fournir un indicateur de vulnérabilité que pour une occurrence donnée de crue. Il n'est pas nécessairement transposable à tout type de temps de retour de crue et suppose d'avoir une image de crue approximativement à l'instant de passage du pic de crue dans la plaine.

3.1.3 Suivi temporel des crues et détection autonome

Il est parfois possible d'avoir plusieurs images de la même crue et ainsi d'accéder à des informations sur la dynamique temporelle des étendues inondées. Les possibilités d'acquisition de plusieurs images exploitables d'une même crue sont conditionnées en particulier par la rapidité d'évolution des étendues inondées dans la plaine d'inondation, en lien avec la période de revisite des satellites. Par ailleurs, dans le cas des satellites optiques, l'acquisition d'une image de crue exploitable n'est possible que de jour, sans couvert nuageux.

Probabilité théorique d'obtention d'images satellitaires de crue exploitables

Dans ce contexte, (Joveniaux, 1986) a quantifié pour plusieurs satellites optiques la probabilité théorique d'obtenir plusieurs images de crue exploitables pour l'étude des inondations. Il ressort de cette étude que les facteurs qui influencent cette probabilité sont la fréquence de revisite du satellite et la probabilité de présence d'un couvert nuageux. Dans le cas d'images SPOT, Landsat TM et NOAA, les résultats obtenus pour la plaine du Gharb (Maroc) et une durée d'observation de 20 jours sont présentés dans le Tableau 3.2.

Satellites (résolution)	Nombre de passages probable du satellite/20 jours	Nombre d'images potentiellement exploitables	Pourcentage de chance d'obtention correspondant
SPOT (20m)	7 à 8	2	83%
		3	57%
Landsat TM (30m)	1 à 2	1	43%
NOAA (1km)	~20	5	91%
		6	79%
		7	63%

Tableau 3.2 : Nombre d'images d'inondation exploitables potentiellement disponibles et probabilités d'obtentions associées pour une période d'observation de 20 jours de la plaine du Gharb (Maroc) (Joveniaux, 1986).

Dans le cas particulier des satellites optiques à haute résolution spatiale (type SPOT) la probabilité d'avoir plus de 3 images en 20 jours paraît faible. Par ailleurs, une durée d'observation de 20 jours n'est pas applicable à tout type de rivière. En particulier, en France métropolitaine, les durées de submersion sont plus faibles, de l'ordre de la semaine, de quelques jours voire de quelques heures en climat méditerranéen. La probabilité d'obtention d'images optiques exploitables en est alors réduite.

Le cas des images spatiales radar est un peu différent car la qualité des images n'est pas affectée par le couvert nuageux. La probabilité d'obtenir une image est donc plus proche de la fréquence de revisite du satellite. Cependant, un élément à prendre en compte pour les capteurs radar est la présence de vent qui peut rendre l'eau rugueuse et difficilement détectable sur les images pour certaines polarisation et certaines longueurs d'onde.

Exploitation de séries temporelles d'images de crue

Dans le cas où plusieurs images d'une même crue sont disponibles, des études ont montré le potentiel des images satellitaires pour la caractérisation spatio-temporelle de l'étendue inondée (Liu et al., 2002; Ryu et al., 2002; Townsend, 2001; Yésou et al., 2000). Une série temporelle d'image permet ainsi de générer des cartes d'inondation pour différentes dates et d'accéder à des informations objectives et qualitatives sur l'évolution temporelle de l'étendue inondée. La Figure 3.1 présente un exemple d'estimation de l'évolution temporelle de l'étendue inondée, lors d'une décrue de la Meuse entre Sedan et Charleville-Mézières (crue de 1993-1994). Le code de couleurs représente la dernière date à laquelle la surface considérée est détectée comme inondée, par exemple, les surfaces en mauve sont inondées le 25/12/1993 et ne le sont plus après.

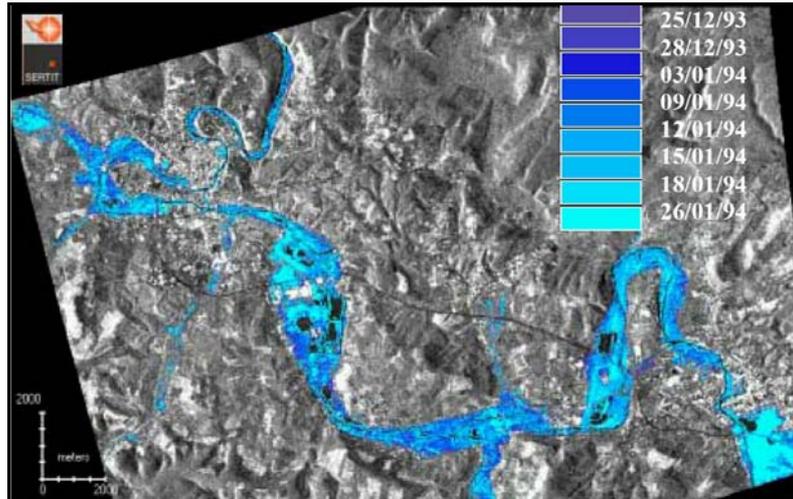


Figure 3.1 : Exemple de carte d'évolution temporelle de surfaces inondées (SERTIT, Sedan / Charleville Mézières (25-12-1993- 02-02-1994) sur fond d'une image ERS (Yésou et al., 2000).

De la même façon, (Töyrä & Pietroniro, 2005), utilisent une série temporelle d'image radar et optiques pour caractériser les durées de submersion de zones d'eau libre à l'échelle du pixel. Dans une autre étude (Islam M. & Sado K., 2000), la vulnérabilité aux inondations dans une plaine alluviale est caractérisée par le type d'occupation du sol et la durée de submersion. La durée de submersion est estimée à partir de la fréquence de submersion calculée sur trois images NOAA (satellite optique à base résolution spatiale : 1km) d'une même crue. L'inconvénient de ce type d'approche est d'estimer des durées de submersion à partir d'une observation temporellement discontinue. Par conséquent, la durée de submersion obtenue ne peut être représentative d'un point de vue fréquentiel qui si le laps de temps séparant l'acquisition de deux images successives est très grand vis à vis de la dynamique d'évolution de l'inondation. Avec des images spatiales à basse résolution (~km), ce type de méthode n'est applicable que pour des inondations très étendues (larges), dans des plaines d'inondation d'hydrodynamiques très lentes. En effet, (Puech & Vidal, 1995) ont montré que la durée de submersion obtenue à partir d'images satellitaires est une information incomplète, qui peut parfois être mise en défaut si elle est confrontée avec des hydrogrammes mesurés in situ (Figure 3.2).

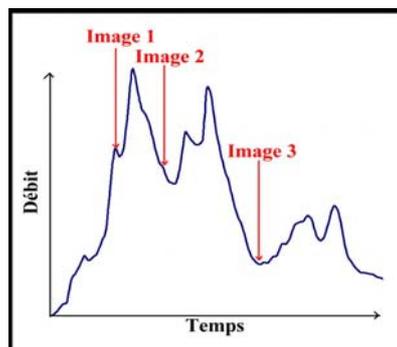


Figure 3.2 : Exemple d'hydrogramme et de dates d'acquisition d'images pour lesquelles l'estimation des durées de submersion à partir des images est erronée.

La Figure 3.2 montre que les durées de submersion estimées à partir des images ignorent totalement le passage des pics de crue et ne peuvent en conséquence pas reproduire les durées de submersion réelles.

3.1.3.2 Détection et cartographie autonome d'inondations par télédétection spatiale

Dans un contexte différent, (Ip et al., 2006), présentent une nouvelle voie de détection automatique des crues à l'aide d'un logiciel (ASE : Autonomous Sciencecraft Experiment) embarqué sur le satellite EO-1 (Earth Observing 1) dans le cadre du programme New Millenium de la NASA. Le satellite EO-1 est équipé d'un capteur hyperspectral (Hyperion) et d'un logiciel de classification d'images autonome afin de détecter et cartographier des étendues inondées. Les premiers tests de détection de crues grâce à un algorithme autonome embarqués sur plate-forme spatiale s'avèrent concluants en quasi-temps réel, de jour, en absence de couverture nuageuse. Ce type de méthode de cartographie des inondations en quasi-temps réel peut s'avérer très pertinent pour la gestion des inondations et leur suivi temporel, mais est considérablement contraint par le couvert nuageux et la fréquence de revisite du satellite. Il ne peut donc a priori être adapté de façon systématique qu'à des plaines d'inondations de dynamique relativement lentes.

3.1.4 Cartographie des extensions maximales de crue

Une information très utile pour la gestion des inondations est l'étendue maximale des eaux. Les satellites imageurs à haute résolution spatiale (résolutions de l'ordre de 20 à 30 m), avec une période de revisite moyenne de l'ordre d'une vingtaine de jours, ont une probabilité faible d'acquisition d'images d'inondation au moment du passage du pic de crue dans la plaine (Cf. § 3.1.3). En effet, selon les régions d'étude, la période de récession des eaux après une crue peut aller de quelques heures à quelques mois. En France, généralement, cette période n'excède pas une semaine. Aussi, il est rare qu'un satellite puisse acquérir une image au moment des plus hautes eaux.

Pour retrouver l'étendue maximale des eaux avec une image optique acquise après le passage du pic de crue, (Brivio et al., 2002) proposent un algorithme d'analyse couplée de l'étendue inondée après le passage du pic de crue avec des données topographiques. Cet algorithme suppose que la totalité de l'eau présente dans la plaine d'inondation quelque temps après le passage du pic de crue provient des débordements du lit mineur de la rivière. A l'aide d'une matrice de coût d'écoulement depuis la rivière jusqu'aux limites de la plaine d'inondation, l'algorithme recalcule une étendue maximale possible de l'inondation. Le calcul de cette matrice de coût d'écoulement est basé sur les altitudes du terrain naturel, et la distance à la rivière. Bien que ce type de méthode fournisse une étendue maximale des eaux qui ne provient pas d'une observation directe, son intérêt est de valoriser des images acquises après les phases actives de la crue et d'accéder à une information d'étendue inondée maximale qui aurait difficilement pu être obtenue en l'absence d'une image satellitaire.

3.1.5 Techniques de traitement d'images couramment employées pour la cartographie d'inondations

Le paragraphe suivant présente les principales techniques de traitement d'images couramment employées pour la cartographie d'inondations et leur caractérisation spatiale en deux dimensions.

La Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO)

La PIAO est basée sur l'interprétation visuelle des images par un opérateur. Ce dernier délimite, sous Système d'Information Géographique (Davis & Simonett, 1991), les objets d'intérêt, par exemple une zone inondée. Cette démarche est en particulier pertinente pour une analyse préalable qualitative d'images (Henry, 2004), ou en complément à d'autres méthodes de traitement d'image (Yésou et al., 2000). Le principal inconvénient de cette méthode est de laisser une grande place à la subjectivité de l'opérateur.

La classification d'image pixel à pixel

La classification repose sur une partition, en classes C_i , de l'espace des radiométries de l'image, la dimension de cet espace étant égale au nombre de bandes spectrales de l'image de départ. A chaque classe C_i on associe une valeur caractéristique V_i . La classification d'une image pixel à pixel consiste alors à créer une nouvelle image ayant la valeur V_i si le pixel considéré a des intensités dans chacune des bandes de l'image initiale appartenant à la classe C_i .

Un cas particulier de la classification d'image est le seuillage radiométrique sur une bande spectrale. Celui-ci consiste à créer une image binaire (0-1) par application d'une fonction de type seuil aux valeurs des pixels de l'image dans la bande spectrale considérée. Cette méthode est couramment employée pour la cartographie d'objets dont la radiométrie est très contrastée par rapport à celle des autres objets présents sur l'image, comme par exemple des étendues inondées (Henry, 2004; Horritt et al., 2003; Maurel, 1988; Puech, 1992; Zhou et al., 2000). Elle est efficace et relativement facile à mettre en œuvre. Une des principales difficultés de cette méthode est la détermination d'une valeur de seuil dans le cas où aucune donnée complémentaire concernant l'étendue inondée n'est disponible (Ryu et al., 2002).

La segmentation par modèles de contour actifs (« Snake »)

Les modèles de contour actifs sont des courbes en deux dimensions dont les nœuds sont mobiles. La segmentation d'images à l'aide de ces modèles est basée sur le calcul de statistiques locales de l'image et sur la croissance de forme d'un polygone (ou d'une polyligne) initial. Ce polygone initial est étendu spatialement afin d'épouser les contours de l'objet d'intérêt. Les paramètres associés à ces algorithmes sont relativement nombreux et comprennent en particulier la tolérance au bruit et la courbure des lignes du polygone. La dynamique des contours du polygone est basée sur la notion d'énergie interne et externe, le but étant de minimiser l'énergie totale présente le long de la courbe. En particulier (Horritt, 1999; Horritt et al., 2001) propose un algorithme à modèle de contour actif pour extraire l'étendue d'une image radar de crue.

La détection de changement

Dans un objectif de cartographie d'inondations, la détection de changement implique la disponibilité d'au minimum deux images (de caractéristiques radiométriques et spatiales similaires) dont une hors crue et l'autre en période de crue. Dans le cas d'images optiques, il est nécessaire d'avoir des bandes spectrales communes sur les deux images. Dans le cas du radar, il est de plus nécessaire que les conditions d'acquisition - angle de visée et sens de parcours de l'orbite - soient similaires (Gineste, 1998; Henry, 2004). En effet, dans le cas d'angles de visée trop éloignés ou de sens de parcours de l'orbite différents, il est très délicat de mettre les images en correspondance spatiale à cause des

distorsions géométriques (Cf. §. 2.2.5). Pour les images optiques, la détection de changement peut être basée sur une Analyse en Composantes Principales (ACP) (REFER[®]) sur les différentes bandes spectrales ou une différence (ou un rapport) radiométrique pixel à pixel des images - ou sur une fenêtre glissante - (Badji & Dautrebande, 1997; Delmeire, 1997; Pelletier et al., 2005). Pour les images radar, une différence - ou un rapport - radiométrique ou une mesure de décorrélation du chatouement (Rignot, 1993) peut être employée.

3.2 Estimation de niveaux d'eau et de débit par télédétection

Les informations altimétriques concernant les champs d'inondation sont très utiles pour la caractérisation et la gestion des inondations (Henry, 2004). Les techniques d'estimation des niveaux d'eau grâce à la télédétection spatiale ou aéroportée se déclinent sous plusieurs formes. Dans cette section, le choix a été fait de séparer ces techniques en trois catégories : les mesures altimétriques directes, les mesures par photogrammétrie et interférométrie radar et les méthodes indirectes. Les méthodes directes utilisent des systèmes de mesure de distance (LiDAR, radar) entre le capteur et la surface de l'eau. L'interférométrie et la photogrammétrie estiment l'altitude des objets émergés pour en déduire des niveaux d'eau. Les méthodes indirectes couplent des cartes d'inondations issues d'images de télédétection et d'informations altimétriques (données topographiques) ou de mesures in situ.

3.2.1 Mesures altimétriques directes

L'altimétrie par télédétection satellite ou aérienne utilise les systèmes LiDAR et radar altimétriques. Ces deux techniques sont basées sur l'émission d'un signal au Nadir en direction de la surface du sol et la mesure du temps d'aller retour de ce signal. La mesure du temps d'aller retour du signal permet de déduire la distance capteur-surface de la Terre en lien avec la célérité des ondes dans l'atmosphère. Cette distance est ensuite mise en corrélation avec la position du capteur vis à vis d'une surface terrestre de référence (ellipsoïde) de manière à fournir l'altitude de l'objet observé (Gitelson et al., 1990; Ritchie et al., 1994).

Utilisée en premier lieu pour caractériser la dynamique altimétrique de la surface des océans, l'altimétrie satellite radar est aujourd'hui étendue aux mers et lacs continentaux et aux rivières de largeurs importantes telles que l'Amazone. En effet, (Bercher et al., 2006; Birkett, 1994; Birkett, 1998; Cudlip et al., 1990), utilisent des systèmes spatiaux radar altimètres pour estimer des niveaux d'eau dans les lits de grands cours d'eau et de lacs. Dans le cas de l'Amazone, les RMS (Erreurs quadratiques moyennes) obtenues par (Birkett, 1998) sur les estimations de niveau d'eau sont de l'ordre de 25cm pour lit majeur et 60cm pour le lit mineur. Dans cette étude, la largeur minimale d'observation de la rivière pour obtenir ces estimations des niveaux d'eau est d'environ 1,5km. Les mesures de niveaux d'eau par altimétrie satellite radar ne sont actuellement applicables qu'aux grands cours d'eau avec des plaines d'inondation très larges et aux grands lacs (Birkett, 2000). Dans le cas de rivières larges avec des relations débit/hauteur suffisamment stables, il est envisageable d'estimer les débits transitant à partir de mesures de niveau d'eau mesurés par satellite altimètre (Schultz &

Engman, 2000), sous réserve que les RMS d'estimation du niveau soient compatibles avec la précision requise.

Depuis 2003, le satellite IceSAT de la Nasa, est équipé d'un LiDAR altimètre spatial (Harding & Jasinski, 2004). Les mesures altimétriques de ce LiDAR spatial ont montré une précision de mesure de niveaux d'eau continentale jusqu'à 3cm (Schutz et al., 2005), avec une précision de positionnement au sol de la mesure de 50 m et une mesure tous les 170 m. Avec ce système, comme pour le radar, les mesures sont possibles de jour comme de nuit, mais avec un couvert nuageux raisonnable.

Les mesures altimétriques directes présentées ci-dessus ont pour principaux avantages d'être systématiques et relativement précises (surtout dans le cas du LiDAR). Ces mesures sont très utiles dans des régions difficiles d'accès pour lesquelles les stations de jaugeage sont quasiment absentes. Par contre, elles ont l'inconvénient de ne donner des mesures de niveau qu'au nadir. Par conséquent, toute la surface terrestre n'est pas couverte par ces satellites. Cela implique que les mesures sont relativement localisées.

3.2.2 Mesures par photogrammétrie et interférométrie radar

Dans le cas où des couples d'images sont disponibles, certaines méthodes permettent d'estimer des niveaux d'eau, ou des variations de niveau d'eau. Ces méthodes se déclinent sous les noms de photogrammétrie (optique) et d'interférométrie radar.

Parmi les techniques photogrammétriques usuelles, il est possible de citer la stéréoscopie. Cette méthode consiste à utiliser les déformations géométriques dues au relief présentes sur un couple d'images optiques acquises de points de l'espace différents pour reconstituer le relief du terrain. Cette technique a été appliquée par (Lane et al., 2003) à des couples de photographies aériennes d'inondation (résolution spatiale 70 cm) afin de déterminer l'altitude de laisses de crue au sol - crue de l'Ouse en 2000 qui a en particulier affecté la ville de York (Royaume-Uni). Cette méthode a permis d'estimer des niveaux d'eau à partir des laisses de crue clairement identifiables sur les images avec une précision de 15 à 79 cm selon les positions dans la plaine d'inondation. Cependant, ce type de méthode est difficile à mettre en oeuvre dans le cas d'images satellitaires parce que leurs résolutions sont souvent plus grossières que celles des photographies aériennes et qu'il est rare d'avoir des couples d'images satellitaires exploitables à cause d'un couvert nuageux souvent important en période de crue et de fréquences de revisite des satellites trop faibles.

L'interférométrie radar exploite les variations de phases dues au déplacement des objets d'une image à l'autre. Cependant, dans le cas des surfaces en eau libre, il y a perte de la cohérence de phase (Alsdorf, 2002) soit à cause de la variabilité de la rugosité de surface de l'eau (vaguelettes dues au vent et au courants), soit à cause des effets spéculaires pour l'eau lisse. Il n'est donc a priori pas possible d'estimer des variations de niveaux d'eau pour l'eau libre. Cependant, en cas de réflexion multiple sur l'eau et des objets émergés, par exemple des arbres, pour des dates d'acquisition relativement proche et des positions du capteur sensiblement identiques, la cohérence de phase est conservée (Alsdorf et al., 2001). Il est alors possible d'utiliser les variations de phases d'une image à l'autre pour estimer des variations de niveau d'eau sous couvert végétal ou en zone urbanisée. En particulier, (Alsdorf et al., 2000) ont mis en évidence des variations de niveau d'eau d'ordre centimétrique, en Amazonie, sous couvert végétal grâce à l'interférométrie radar, en polarisation HH, en bande L,. Ce type d'application

n'est en effet envisageable que pour des longueurs d'onde qui ont la capacité de pénétrer la canopée (longueurs d'ondes en particulier supérieures à 20cm), permettant ainsi le phénomène de réflexions multiples. Cette méthode permet ainsi de détecter de façon précise des variations de niveau, sans pour autant fournir des estimations des niveaux d'eau absolues.

3.2.3 Mesures par mise en correspondance des surfaces inondées avec des données complémentaires

3.2.3.1 *Couplage des surfaces inondées extraites d'images satellitaires avec des mesures in situ*

Dans le cas où un nombre important d'images d'inondations est disponible, il est possible (Smith, 1997) de générer des courbes de tarage liant la surface inondée extraite d'imagerie avec des mesures de débits ou de niveau d'eau in situ. La connaissance de la surface inondée ou de la largeur au miroir permet de déduire une estimation des niveaux ou débit d'eau transitant dans une plaine d'inondation au moment d'acquisition d'images (Kruus et al., 1979; Liu et al., 1983; Shaikh et al., 2001; Sippel et al., 1998; Usachev, 1983). Bien que débits (ou niveaux d'eau) et surfaces inondées soient bien corrélés dans certaines études (Liu et al., 1983; Sippel et al., 1998; Usachev, 1983), (Kruus et al., 1979) ne trouve pas une relation univoque entre niveau d'eau et surface inondée. En effet, (Kruus et al., 1979) met en évidence qu'une augmentation de niveau d'eau peut être concomitante à une augmentation ou une diminution de la surface inondée observée sur image. Le problème de ce type de méthode est la non transposabilité des lois de tarage empiriques générées d'une rivière à l'autre (Smith, 1997). Par contre, dans le cas de cours d'eau à lit tressé, (Smith et al., 1996; Smith et al., 1995) montre que les courbes de tarages générées pour trois rivières différentes sont très proches (Figure 3.3, p.68).

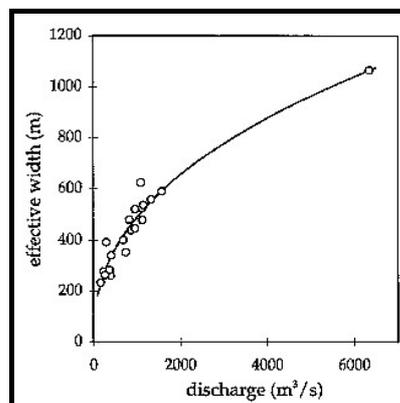


Figure 3.3 : Courbe de tarage liant « largeur efficace » inondée (surface ramenée à la longueur du linéaire de rivière) extraite d'images RSO (ERS) avec des mesures de débits (Smith et al., 1995).

Ces méthodes de déterminations de courbes de tarage par couplage de surfaces inondées extraites de télédétection avec des mesures de niveau d'eau et de débit in situ paraissent donc relativement efficaces et stables dans certain cas. Cependant, elles ne sont applicables qu'à des cours d'eau avec des dynamiques d'évolution des inondations très lentes qui permettent l'acquisition d'un grand nombre d'images. Par ailleurs, ce type de courbes de tarage suppose que la liaison entre largeur au miroir (ou l'aire de la surface inondée) et débit (ou niveau d'eau) est univoque, ce qui n'est pas toujours le cas en

particulier en raison d'effets d'hystérésis et de modifications importantes de la morphologie de la rivière pendant le passage d'une crue.

3.2.3.2 Croisement spatial entre des limites d'inondation extraites d'imagerie avec des données topographiques

Il est de plus possible d'estimer des niveaux d'eau à partir d'images de télédétection et de données topographiques (Deneau, 2002; Smith, 1997). La validité et la précision des estimations de niveau d'eau sont cependant très dépendantes de la résolution spatiale et de la précision de localisation des données images et topographiques. (Brakenridge et al., 1998; Gupta & Banerji, 1995; Miller, 1986) parviennent à estimer des niveaux et des volumes d'eau par croisement de limites d'inondation avec des cartes topographiques. Les niveaux estimés sont cohérents avec des mesures de terrain. En particulier, (Brakenridge et al., 1998) obtiennent des incertitudes sur les estimations des niveaux d'eaux comprises entre 1 et 3 m (Figure 3.4, p.69).

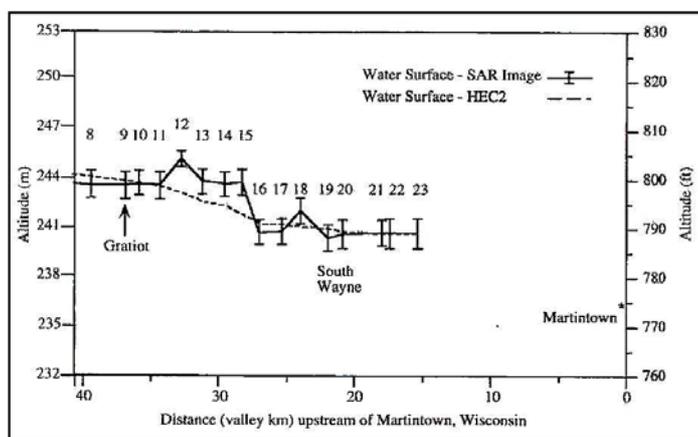


Figure 3.4 : Estimations des niveaux d'eau obtenues par (Brakenridge et al., 1998) par croisement de limites d'inondation extraites d'imagerie RSO avec des cartes topographiques, comparées à une simulation hydraulique mono-dimensionnelle.

Ces incertitudes d'estimation de ces niveaux d'eau sont relativement importantes et paraissent peu adaptées à la modélisation hydraulique.

Afin d'obtenir des estimations des niveaux d'eau avec des incertitudes plus faibles (Raclot, 2003a) propose une « approche photo ». Cette approche est basée l'analyse de photographies aériennes d'inondation et comporte trois phases : 1) une phase de traitement des données de télédétection visant à extraire les limites d'inondation et les objets émergents à l'intérieur de la zone inondée, 2) une phase de structuration de l'information dans un Système d'Information Géographique (SIG), 3) une phase de fusion et de mise en cohérence des informations extraites des photographies (développement d'un algorithme de mise en cohérence inspiré de l'hydraulique et de techniques empruntées à l'intelligence artificielle).

La première phase vise à extraire en particulier les limites d'inondation et des objets émergents à l'intérieur de la zone inondée Figure 3.5 (p.70).

Dans la deuxième phase de « l'approche photo », les photographies aériennes sont utilisées pour structurer la plaine d'inondation en casiers hydrauliques sur lesquels le niveau d'eau est supposé

constant et déterminer les connexions et sens d'écoulement entre casiers (Puech & Raclot, 2002) (Figure 3.5, p.70).

La troisième phase repose en premier lieu sur une fusion des données extraites des photographies aériennes avec des données topographiques afin d'extraire des niveaux d'eau par casier. Ainsi, pour chaque casier, l'ensemble des valeurs d'altitudes extraites permet de définir un intervalle de valeurs dans lequel le niveau d'eau réel est compris. Ensuite, un algorithme de mise en cohérence hydraulique est appliqué aux estimations (intervalles bornés par un majorant et un minorant) de niveaux d'eau précédemment extraits (Raclot & Puech, 2003). Cet algorithme impose une cohérence des estimations de niveau d'eau vis à vis des écoulements hydrauliques identifiés à la deuxième étape. La mise en cohérence hydraulique repose sur le principe hydraulique selon lequel les niveaux d'eau décroissent de l'amont vers l'aval.

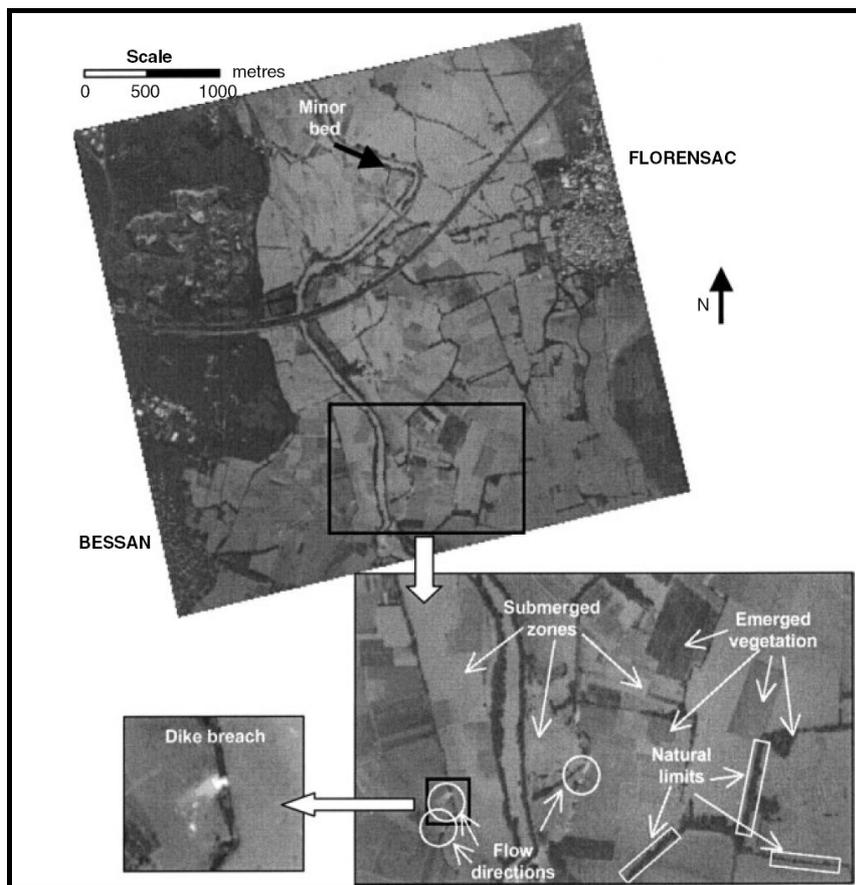


Figure 3.5 : Exemple de photographies aériennes de crue (Hérault, novembre 1994) à partir de laquelle peuvent être extraites des informations de limites d'inondation, d'émergence d'objets, de limites naturelles de casier, de connexions, directions et sens d'écoulement entre casiers voisins (Puech & Raclot, 2002).

Appliqué aux estimations de niveau d'eau extraites dans la deuxième phase de « l'approche photo », l'algorithme impose une décroissance des majorants de l'amont vers l'aval (Figure 3.6, ci-dessous) et une croissance des minorants de l'aval vers l'amont. Par ailleurs, dans le cas particulier où des casiers sont en équilibre relatif (pas d'écoulement entre les casiers), l'algorithme impose une égalité des

majorants et des minorants d'un casier à l'autre. L'algorithme permet ainsi une diminution des intervalles d'estimation.

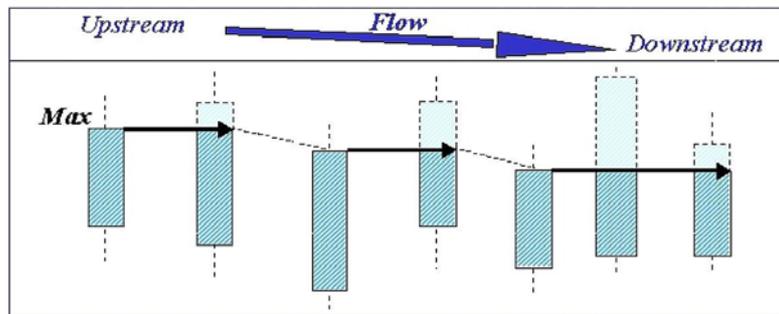


Figure 3.6 : Illustration de la mise en cohérence hydraulique par abaissement des bornes maximales d'estimation des niveaux d'eau (Raclot & Puech, 2003)

L'approche photo a été appliquée à trois sites d'études (Aisne, Moselle, Hérault) et a permis d'estimer des niveaux d'eau par casier avec des demi-incertitudes moyennes inférieures à 20cm. Cette méthode fournit des estimations des niveaux d'eau avec des incertitudes tout à fait raisonnables, adaptée aux exigences requises en hydraulique fluviale. Elle n'a par contre été appliquée qu'à des photographies aériennes. Il paraît en conséquence très intéressant de transférer cette méthode aux images satellitaires, avec des résolutions spatiales plus grossières.

3.3 Utilisation des images satellitaires pour l'aide à la modélisation hydraulique

Cette section présente des travaux qui exploitent les images satellitaires dans le cadre de la modélisation hydraulique des inondations.

Les modèles hydrauliques sont très pertinents pour l'aide à la gestion des inondations (De Roo et al., 2000; Horritt & Bates, 2001; Pelletier et al., 2005). Cependant, la détermination des valeurs des paramètres de ces modèles est souvent complexe et délicate. Les images satellitaires d'inondation, avec une vision spatiale objective, peuvent être très utiles pour l'aide à la modélisation hydraulique, par exemple pour le calage, la validation, ou l'inversion de modèles hydrauliques.

Le calage d'un modèle consiste à optimiser, par simulations successives, les paramètres afin d'obtenir des résultats simulés les plus proches possibles des données observées.

La modélisation inverse est plus complexe. Elle utilise un code adjoint (ou modèle inverse) du modèle hydraulique (direct) qui a pour objectif de calculer les valeurs des paramètres correspondant à un résultat de simulation égal à des données observées. Cette technique, basée sur la théorie du contrôle optimal, recherche des valeurs optimales de paramètres d'un modèle en minimisant une fonction objectif représentative de l'écart entre simulé et observé (Honnorat et al., 2005). La minimisation est rendue possible grâce au développement d'un code de calcul, appelé code adjoint du modèle hydraulique, qui permet de connaître les dérivées partielles de la fonction objectif par rapport aux paramètres à optimiser. Les valeurs optimales des paramètres sont alors obtenues aux points où les dérivées partielles de la fonction objectif sont nulles.

Dans cette section, nous nous intéresserons plus particulièrement au calage des modèles hydrauliques.

3.3.1 Incertitude et équi-finalité

Parmi les paramètres des modèles, certains seulement peuvent être déterminés par des mesures in situ : généralement les conditions aux limites et la géométrie, parfois quelques conditions initiales. Les autres paramètres (non mesurés) doivent être estimés par des méthodes complémentaires. Les valeurs estimées sont soumises à de fortes incertitudes qui se répercutent sur les résultats du modèle.

L'équi-finalité

Dans le cas où les données utilisées pour estimer les paramètres non connus sont en quantité réduite (Aronica et al., 1998; Castaings et al., 2003; Franks et al., 1997; Freer et al., 2004), se produit le phénomène d'équi-finalité. L'équi-finalité est un problème d'autant plus récurrent que traditionnellement, un calage de modèle hydraulique est effectué à partir de mesures hydrométriques in situ seulement.

Le terme équi-finalité a été adopté pour la modélisation environnementale par (Beven, 1993). On parle d'équi-finalité lorsque plusieurs valeurs des paramètres d'un modèle permettent d'obtenir des résultats de simulations qui coïncident avec des mesures in situ alors que ces différentes valeurs numériques n'ont pas nécessairement de validité ou de correspondance physique (Matgen et al., 2004; Pappenberger et al., 2006).

La Figure 3.7 (p. 73) illustre le phénomène d'équi-finalité. Sur celle-ci chaque point correspond à l'évaluation des résultats d'un modèle hydraulique 1D pour une valeur de chaque paramètre. Le paramètre représenté sur cette figure (valeurs en abscisses) est le coefficient de frottement de Manning en lit Mineur. Le calcul des performances du modèle (en ordonnées) est basé sur la comparaison entre des niveaux d'eau simulés par le modèle et des mesures in situ de PHE auxquelles sont associées une incertitude de mesure. Sur cette figure, une performance maximale (égales à 1) signifie que les niveaux d'eau simulés par le modèle coïncident avec l'ensemble des PHE relevées sur le terrain, aux incertitudes de mesures près. On constate que des performances maximales peuvent être obtenues pour des valeurs variables du Manning en lit mineur (comprises entre 0,03 et 0,09) correspondant à des morphologies de rivières très différentes (Cf. Tableau A 5.1 en Annexe 5).

Pour évaluer l'ampleur du phénomène d'équi-finalité, (Beven & Binley, 1992) proposent une méthode nommée GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation). Les tenants et aboutissants de cette méthode seront détaillés au Chapitre 6. Bien que souvent controversée (Beven, 2006), cette méthode a pour avantage d'estimer les incertitudes et la confiance qui peut être accordée aux résultats d'un modèle environnemental.

D'après le paragraphe 1.2.2, la plupart des données disponibles concernant les crues sont ponctuelles dans l'espace et donc peu adaptées pour la modélisation hydraulique (distribuée dans l'espace). C'est pourquoi, les images satellitaires avec une vision spatiale des inondations ont un potentiel d'aide à la modélisation hydraulique très important (Bates et al., 1997; Colby et al., 2000; Liu & De Smedt, 2005; Martinez-Vilalta et al., 2002; Overton, 2005; Pelletier et al., 2005).

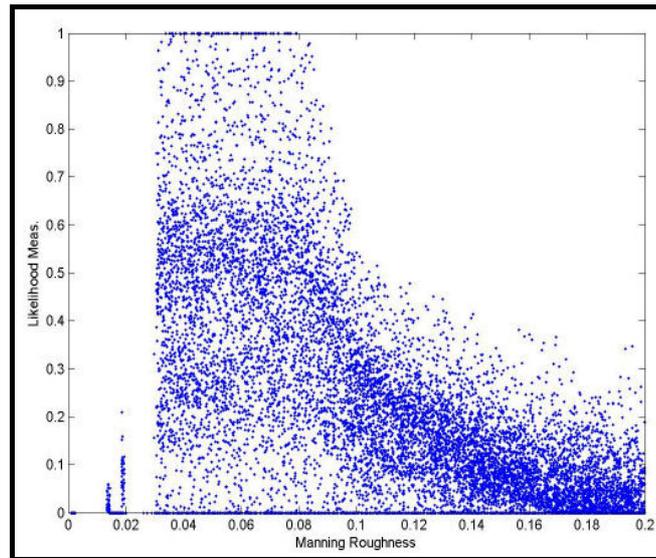


Figure 3.7 : Calcul de performance d'un modèle hydraulique à partir de mesures de Plus Hautes Eaux in situ pour différentes valeurs de frottement en lit Mineur (Matgen et al., 2004).

Afin de valoriser les images satellitaires d'inondation, certaines études portent sur leur aide potentielle dans la modélisation hydraulique. Ces travaux utilisent les images satellitaires à plusieurs fins : l'aide à la détermination des paramètres des modèles, l'analyse des incertitudes ou la validation de résultats de modèles hydrauliques.

3.3.2 Intégration des données spatiales dans la modélisation hydraulique

L'exploitation des données spatiales d'observation de la Terre pour l'aide à la modélisation hydraulique est relativement récente et en cours de développement. Les travaux réalisés actuellement utilisent principalement les étendues inondées extraites d'images satellitaires.

Analyse des incertitudes et de l'équifinalité

Une partie de ces études (Aronica et al., 2002; Aronica et al., 1998; Pappenberger et al., 2005b) analyse les incertitudes et le phénomène d'équifinalité dans la modélisation hydraulique ainsi que le potentiel des images satellitaires pour la réduction de celui-ci. L'objectif est en particulier d'évaluer l'influence des incertitudes sur l'estimation des paramètres tels que les conditions aux limites (Matgen et al., 2004; Pappenberger et al., 2005a), les coefficients de rugosité (Horritt, 2000; Matgen et al., 2004; Pappenberger et al., 2005b) ou la topographie (Horritt, 2002).

Détermination des paramètres des modèles

Au-delà de l'analyse des incertitudes, les études mentionnées dans le paragraphe précédent visent la détermination des paramètres inconnus dans les modèles. Les images de télédétection sont utilisées comme complément d'information aux mesures traditionnelles afin de mieux contraindre les modèles et réduire le phénomène d'équifinalité.

Dans un autre contexte, (Roux & Dartus, 2006; Roux et al., 2003) analysent l'apport des limites d'inondation issues de la télédétection pour la simplification de la géométrie de modèles hydrauliques 1D (cf. §1.2.2). Le champ d'application de cette approche est la modélisation hydraulique simplifiée de plaines d'inondation pour lesquelles la topographie est peu ou mal connue. L'objectif sous-jacent de la simplification de la géométrie est double :

- développer des modèles simples et rapides en terme de temps de calcul pour l'aide à la prévision,
- retrouver une géométrie équivalente de plaine alluviale pour lesquelles la connaissance de la topographie est incertaine.

La méthode suppose connues, pour chaque profil en travers du modèle hydraulique 1D, les limites de la surface en eau en lit majeur et mineur. Ces limites sont utilisées pour optimiser les paramètres géométriques de chaque section et éventuellement les paramètres de freinage à l'écoulement (Figure 3.8).

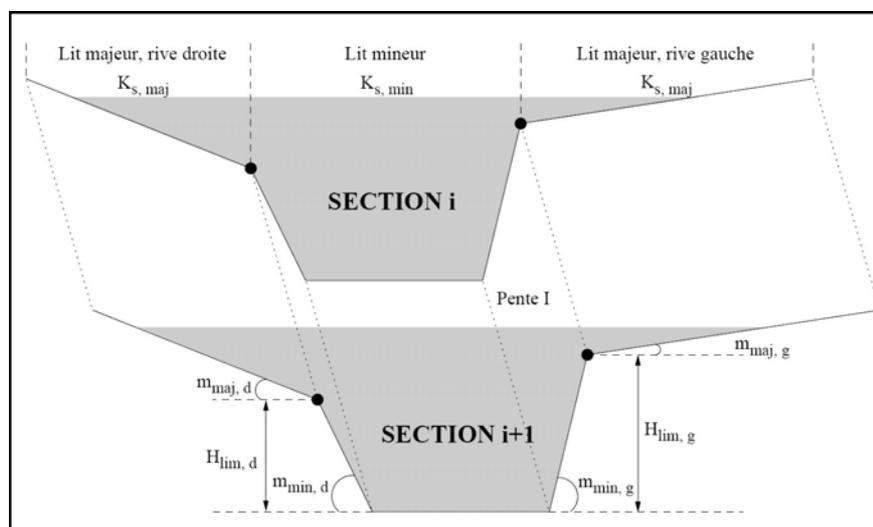


Figure 3.8 : Paramètres géométriques et de freinage à l'écoulement associés au modèle 1D à géométrie simplifiée (Roux et al., 2003).

Validation de modèles hydrauliques

Un autre champ d'utilisation des données de télédétection spatiale pour l'aide à la modélisation hydraulique concerne la validation de modèles hydrauliques. Dans les études concernées (e.g. : (Bates & de Roo, 2000; Horritt, 2006; Horritt & Bates, 2001; Horritt & Bates, 2002)) les étendues inondées simulées et observées sont comparées afin de juger de la qualité des résultats de modèles préalablement calés.

Conclusion

Les satellites imageurs radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) et optiques passifs sont très utiles pour la caractérisation spatiale de l'aléa inondation (Sanders & Tabuchi, 2000; Sassier et al., 2000; Schmugge, 1987). En effet, ils offrent des observations spatialisées d'inondations avec une haute résolution spatiale qu'il serait très difficile voir impossible d'acquérir sans le concours de la télédétection.

Par ailleurs, comme on a pu le voir dans la première partie du document, les images satellitaires d'inondations peuvent s'avérer très utiles dans un contexte opérationnel de gestion de crise. Par exemple, dans le cadre de la charte « Espace et Catastrophes Majeures », certains organismes (e.g. : le SERTIT à Strasbourg) proposent des services de cartographie rapide d'étendues inondées à partir d'images satellitaires (Yésou et al., 2000; Yésou et al., 2002), afin d'aider les secours et les actions entreprises.

De façon générale, les études basées sur l'analyse d'images satellitaires acquises en période de crue fournissent une caractérisation bidimensionnelle fine de l'aléa, mais sans considération pour les niveaux d'eau et la dynamique de la crue.

En conséquence, l'état de l'art dressé au paragraphe Chapitre 3 mène au constat suivant :

Les images satellitaires (radar ou optiques) de rivières en crue sont riches d'informations qui s'avèrent très pertinentes pour la gestion des inondations, mais qui ne sont la plupart du temps que partiellement exploitées.

En effet, la richesse d'informations des images d'inondations va au-delà d'une carte bidimensionnelle de l'aléa (Horritt, 2000; Pappenberger et al., 2005a; Smith et al., 1996). Dans ce contexte, (Brakenridge et al., 1998) ont estimé des niveaux d'eau par croisement entre des limites d'inondation extraites d'une image ERS (radar) et des courbes de niveaux. Bien que cohérentes avec des mesures in situ, ce type d'estimation a des incertitudes trop importantes pour des applications en hydraulique fluviale. Par ailleurs, (Raclot, 2003a) a estimé des niveaux d'eau par croisement entre des informations extraites de photographies aériennes de crue et un MNT fin. Pour parvenir à des incertitudes adaptées à l'hydraulique fluviale, il a complété le croisement d'information par un algorithme de mise en cohérence hydraulique. Aux vues de ces deux approches, il paraît très intéressant de les coupler, pour parvenir à des estimations des niveaux d'eau à partir d'images satellitaires de crue, avec des incertitudes adaptées à la modélisation hydraulique.

Le calage des modèles hydraulique est soumis au phénomène d'équifinalité en particulier en raison d'un manque de données concernant les inondations. Cela montre la nécessité de proposer des sources de données complémentaires et nouvelles concernant les inondations qui permettent d'aider la modélisation hydraulique. Dans ce contexte, les techniques d'observation de la Terre par satellites sont sources très pertinentes d'informations qui restent pour l'instant peu valorisées. Depuis quelques années, des études ont pu montrer les apports des images satellitaires d'inondation pour l'aide à la modélisation hydraulique. Dans celles-ci, les étendues inondées extraites d'images sont exploitées pour caler ou valider des modèles hydrauliques. En complément de ces approches, il semble intéressant d'évaluer les possibilités et l'intérêt d'utiliser des estimations des niveaux d'eau issues d'images de crues pour le calage ou la validation des modèles hydrauliques.

Par ailleurs l'exploitation des images satellitaires de crue dans le cadre de la modélisation hydraulique reste pour l'instant présente uniquement dans la recherche scientifique, hors contexte opérationnel. Dans la continuité des actions de la charte Espace et Catastrophes majeures, qui fournissent des cartes d'inondations, il paraît particulièrement intéressant de développer des chaînes de traitement opérationnelles couplant images satellitaires de crues et modèles hydrauliques qui permettent d'aller jusqu'au calcul du devenir de l'inondation après acquisition d'une image.

Partie II.

Méthodologies

Sommaire de la deuxième partie

Introduction	79
Chapitre 4. Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.	81
Chapitre 5. Estimation des niveaux d'eau	95
Chapitre 6. Intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique.	111

Introduction

L'état de l'art dressé au paragraphe Chapitre 3 a montré que les images satellitaires (radar ou optiques) de rivières en crue sont riches d'informations qui ne sont la plupart du temps que partiellement exploitées. En complément des approches traditionnelles qui visent à cartographier les étendues inondées, il semble important de valoriser les images satellitaires par une quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau et par leur intégration dans la modélisation hydraulique. En particulier, une chaîne de traitement opérationnelle, permettant de passer d'une image satellitaire de crue à un modèle hydraulique de prévision est une valorisation des images satellitaires de crue très utile dans la gestion des inondations. Actuellement, dans le cadre de la charte « Espace et Catastrophes majeures », une exploitation opérationnelle des images satellitaires consiste à fournir des cartes d'inondation. En complément de ce type d'approche, il semble prometteur de développer une chaîne de traitement qui permette l'assimilation ou l'intégration comme condition initiale de la donnée satellitaire dans un modèle de prévision. Cette chaîne permettrait de prédire les étendues inondées ou les niveaux d'eau dans une plaine dans les quelques heures qui suivent l'acquisition d'une image satellitaire de crue (Figure 0.1).

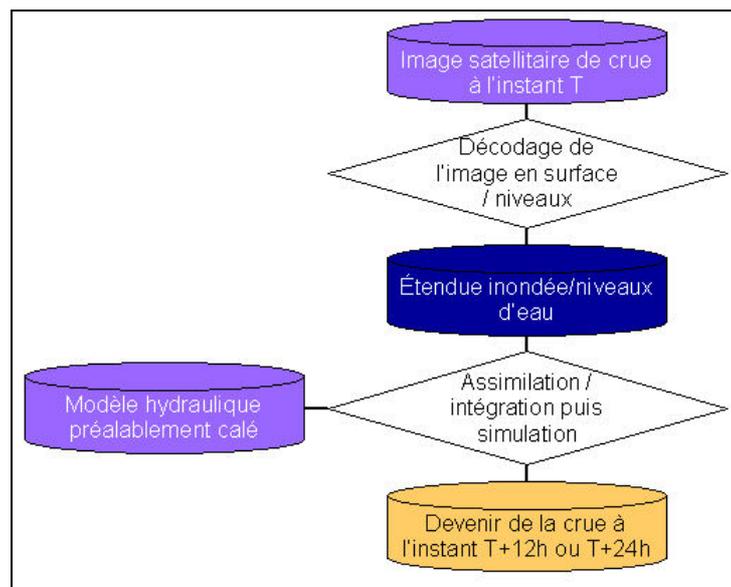


Figure 0.1 : Schéma d'une chaîne de traitement opérationnelle permettant d'exploiter une image satellitaire de crue pour parvenir à la prévision.

La perspective d'une chaîne de traitement opérationnelle est l'élément moteur des méthodologies de la thèse. Une telle chaîne nécessite en particulier des méthodes : 1) de décodage d'une image satellitaire en informations d'étendues inondées et/ou de distribution spatiale des niveaux d'eau, 2) de calage d'un modèle hydraulique et 3) d'assimilation de la donnée satellitaire dans un modèle hydraulique. Dans la thèse, nous avons choisi de nous concentrer sur les deux premiers éléments nécessaires à cette chaîne de traitement opérationnelle.

Cette partie du document présente leur cœur des travaux de thèse. Elle vise à compléter l'extraction des étendues et limites d'inondations à partir d'une image satellitaire radar par la quantification de la

distribution spatiale des niveaux d'eau, et à améliorer le calage des modèles hydrauliques grâce aux caractéristiques tridimensionnelles extraites de cette image.

Les méthodologies développées pour répondre à ces objectifs sont à l'intersection de trois grands domaines de recherche qui sont la télédétection par satellite, l'analyse spatiale et la modélisation hydraulique. Pour plus de clarté, la présentation des travaux dans ces trois domaines est structurée en trois chapitres. Il est néanmoins important de garder à l'esprit que les travaux dans un domaine ne sont pas déconnectés des autres, mais qu'ils visent à apporter des informations nécessaires aux travaux dans les autres domaines. En conséquence, les choix effectués dans chaque chapitre sont conditionnés par les objectifs visés dans les autres et de façon plus générale par la perspective d'une chaîne de traitement opérationnelle.

Le Chapitre 4 vise à extraire d'une image satellitaire radar de crue une carte d'inondation sur laquelle l'absence ou la présence d'eau est connue de façon certaine, et des bordures d'inondation pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau. Les bordures de l'inondation sont considérées pertinentes si elles permettent, par croisement avec un modèle numérique de terrain, d'estimer des niveaux d'eau sous la forme d'intervalles [Min ; Max] au sein desquels le niveau d'eau réel est inclus. Ce chapitre a ainsi pour objectif de fournir des informations utiles pour l'aide au calage d'un modèle hydraulique - carte d'inondation certaine - et pour l'estimation des niveaux d'eau - bordures pertinentes.

L'objectif du Chapitre 5 est d'analyser les bordures pertinentes de l'inondation issues des travaux en télédétection - Chapitre 4 - pour quantifier la distribution spatiale des niveaux d'eau sous forme d'intervalles dont les tailles sont compatibles avec les précisions requises dans le cadre de la modélisation hydraulique. Pour cela, ce chapitre vise à transférer « l'approche photo » (Raclot, 2003a) - Cf. § 3.2.3.2 - aux images satellitaires, cette dernière étant basée sur le croisement des informations planimétriques extraites de photographies aériennes de crue avec un MNT fin, et l'application d'un algorithme imposant une cohérence spatiale des estimations de niveau d'eau vis à vis d'un écoulement hydraulique.

Le Chapitre 6 vise à améliorer le calage des modèles hydrauliques grâce à l'intégration de caractéristiques hydrauliques extraites d'une image satellitaire de crue, en complément de données hydrométriques traditionnelles (e.g. hydrogrammes observés). Il a pour objectif sous-jacent de montrer l'apport des images satellitaires pour la réduction de l'équifinalité dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique. Pour cela un premier calage sera réalisé de façon traditionnelle à partir d'hydrogrammes observés puis poursuivi grâce à l'intégration d'une carte d'inondation certaine ou d'une distribution spatiale des niveaux d'eau extraite d'une image satellitaire RADAR. Le Chapitre 6 a ainsi pour objectif de permettre le développement de modèles mieux contraints et par conséquent plus fiables en prévision et prévention.

Chapitre 4.

Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.

Sommaire

4.1	Pré-traitements des images satellitaires radar	82
4.2	Classification « eau-non eau » sur les images	84
4.3	Extraction d'une carte d'inondation certaine	86
4.3.1	Traitement des « sur-détections »	87
4.3.2	Traitement des « sous-détections »	88
4.3.3	Carte d'inondation certaine	88
4.4	Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau	89
4.4.1	Extraction des bordures floues et prise en compte de l'incertitude spatiale de positionnement de la limite d'inondation	90
4.4.2	Identification des limites d'inondation non pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau	91
4.4.3	Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.	92
4.5	Conclusion	92

Ce chapitre vise à extraire d'une image satellitaire radar de crue des informations pertinentes pour l'aide à la modélisation hydraulique et l'estimation des niveaux d'eau en plaine d'inondation.

Comme on a pu le constater au Chapitre 3, la cartographie de l'aléa inondation est une exploitation relativement courante des images satellitaires radar⁹. Cependant, les cartes d'inondation qui sont extraites peuvent être localement fausses (Horritt et al., 2003), en particulier à cause d'objets émergés qui masquent l'eau. C'est pourquoi, dans ce chapitre, les sources d'erreurs potentielles dans la cartographie d'inondation sont identifiées afin de ne conserver que la partie certaine d'une carte d'inondation extraite d'une image radar.

Par ailleurs, les bordures d'inondation extraites d'une carte d'inondation certaine n'ont pas toute la même pertinence pour une estimation locale du niveau d'eau. En effet, selon la morphologie du terrain, le croisement des bordures d'inondation avec un MNT ne permet pas toujours d'estimer des niveaux d'eau de façon précise. En conséquence, ce chapitre vise dans un deuxième temps à extraire de la carte d'inondation certaine les bordures d'inondations pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

L'originalité de la méthode de cartographie proposée dans la thèse est d'être orientée vers l'hydraulique et de rendre une carte d'inondation extraite d'une image satellitaire radar compatible avec des problématiques d'aide à la modélisation hydraulique et d'estimation des niveaux d'eau.

En préalable d'une méthode de cartographie orientée vers l'hydraulique, ce chapitre propose des prétraitements éventuels et une méthode de classification eau-non eau d'une image satellitaire radar.

⁹ Dans la suite du document, pour plus de simplicité, le terme radar désignera les capteurs Radar à Synthèse d'Ouverture.

4.1 Pré-traitements des images satellitaires radar

Les images radar sont soumises aux effets du chatoiement (« speckle » : bruit multiplicatif) (Ulaby & Dobson, 1989), ce qui rend parfois leur interprétation difficile sans traitements préalables (Bruniquel & Lopes, 1997).

Un filtrage temporel, un filtrage spatial, ou une combinaison des deux permet de réduire les effets du chatoiement. Les filtres temporels (Bruniquel & Lopes, 1997; Gineste, 1998) nécessitent au moins deux images radar avec des caractéristiques d'acquisition semblables (e.g. : sens de parcours de l'orbite, angle d'incidence, résolution spatiale) et sont d'autant plus efficaces que le nombre d'images utilisées est important. Les filtres spatiaux ont pour principal inconvénient de dégrader la résolution spatiale des images. Avec un objectif de cartographie précise des limites d'inondation, la dégradation de la résolution spatiale doit être réduite au minimum, tout en permettant une exploitation pertinente des images. C'est pourquoi, il est important de trouver un compromis raisonnable entre réduction du chatoiement et dégradation de la résolution spatiale des images.

Un indicateur usuel du niveau de chatoiement sur image radar est l'ENL (« Equivalent Number of Looks », Cf. § 2.2.3) (Henry, 2004). Si l'ENL est faible, un filtrage spatial peut s'avérer nécessaire, mais la taille de la fenêtre de filtrage doit être petite afin de limiter la dégradation de résolution spatiale. Par contre, si l'ENL a une valeur suffisamment forte, il est possible d'éviter l'emploi d'un filtrage spatial.

D'après la formule (2.5) (p.44), et suivant l'hypothèse que les variations d'intensité sur une zone homogène sont essentiellement dues au chatoiement, les coefficients de variation de l'intensité et du chatoiement sur une surface homogène sont du même ordre de grandeur. Le coefficient de variation du chatoiement peut alors être approché par la relation suivante :

$$CV_{\text{chatoiement_surf_homogène}} \sim CV(I_{\text{surf_homogène}}) \sim \sqrt{\frac{1}{\text{ENL}}} \quad (4.1)$$

Dans l'équation (4.1) $CV_{\text{chatoiement_surf_homogène}}$ et $CV(I_{\text{surf_homogène}})$ désignent respectivement les coefficients de variation du chatoiement et de l'intensité sur une zone homogène.

Suivant l'hypothèse que le chatoiement obéit à une loi de probabilité Gamma (Henry, 2004; Lopes et al., 1993; Ulaby et al., 1986), la fonction de densité de probabilité f du chatoiement peut être estimée, sur une surface homogène, par la relation suivante :

$$f(X) \sim \frac{1}{\Gamma(\text{ENL})} \cdot \left(\frac{\text{ENL}}{I_{\text{moy_surf_homogène}}} \right)^{\text{ENL}} \cdot \exp\left(\frac{-\text{ENL} \cdot X}{I_{\text{moy_surf_homogène}}} \right) \cdot X^{\text{ENL}-1} \quad (4.2)$$

La relation (4.2) permet en particulier d'estimer les quantiles des distributions statistiques locales du chatoiement.

Dans la méthode, nous avons choisi d'utiliser les quantiles à 5% ($Q^{5\%}$) et 95% ($Q^{95\%}$) pour juger de la gêne occasionnée par le chatoiement sur la détection de l'eau libre sur une image radar.

Les zones d'eau libre (en l'absence d'effet dus au vent) et de forêt sont relativement homogènes. En conséquence, la relation (4.1) peut leur être appliquée et les distributions statistiques du chatoiement sur l'eau et la forêt peuvent être supposées à loi de probabilité Gamma.

Soient $IQ_{\text{eau}} = [Q_{\text{eau}}^{5\%}; Q_{\text{eau}}^{95\%}]$ et $IQ_{\text{forêt}} = [Q_{\text{forêt}}^{5\%}; Q_{\text{forêt}}^{95\%}]$ les intervalles radiométriques définis par les quantiles à 5% et 95% de la distribution statistique du chatoiement pour l'eau libre et la forêt. En théorie, ces intervalles contiennent 90% des réalisations possibles du chatoiement pour les couvertures du sol eau et forêt. En partant de l'hypothèse que l'une des classes d'occupation du sol la plus proche de l'eau libre (en terme de réponse radiométrique) est la forêt (Cf. Figure 2.14, p.54), nous proposons de considérer que l'ENL est suffisamment élevée pour que les effets du chatoiement sur la détection de l'eau soient restreints si les intervalles IQ_{eau} et $IQ_{\text{forêt}}$ sont disjoints (Figure 4.1).

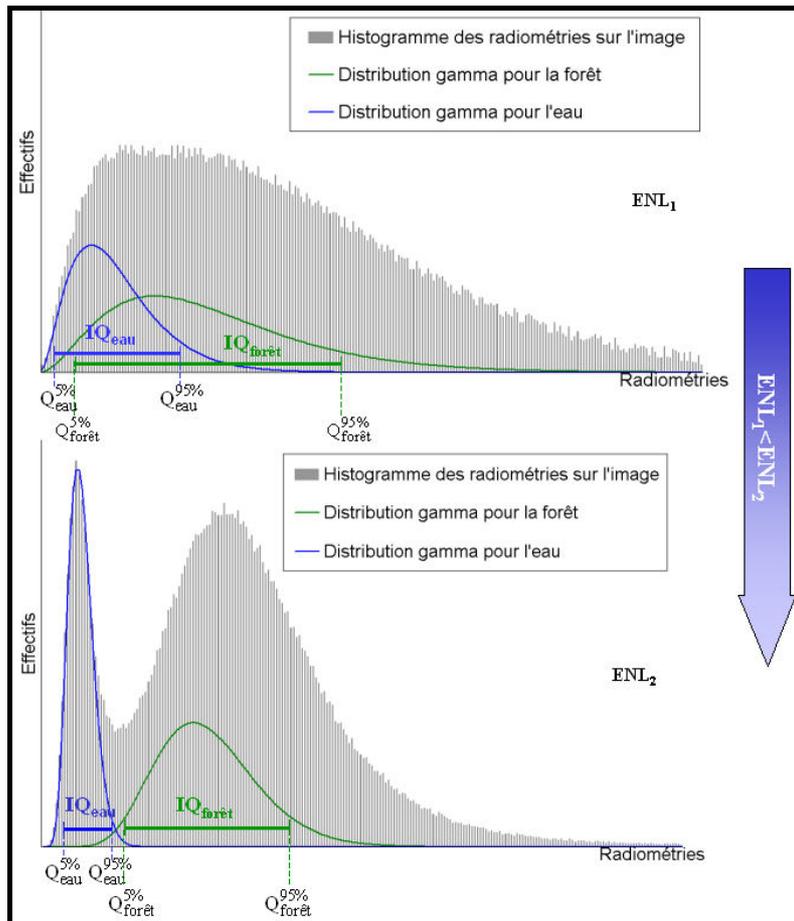


Figure 4.1 : Illustration sur des histogrammes de l'influence du chatoiement pour la discrimination de l'eau sur les images radar.

En haut : L'ENL est trop faible, ce qui entraîne des confusions radiométriques potentiellement importantes entre l'eau et la forêt (intervalles IQ non disjoints).

En bas : L'ENL est suffisamment élevée pour permettre la discrimination radiométrique relativement claire de l'eau et de la forêt (intervalles IQ disjoints).

En conséquence, le choix a été fait de considérer qu'un filtrage spatial n'est pas indispensable si ces intervalles sont disjoints. Dans le cas contraire, les filtres utilisés auront pour objectifs de disjoindre ces deux intervalles.

4.2 Classification « eau-non eau » sur les images

La méthode d'estimation des niveaux d'eau qui sera présentée au Chapitre 5 est en particulier basée sur un croisement des bordures d'inondation extraites d'une image satellitaire avec un MNT. La qualité des estimations de niveau d'eau obtenues est donc conditionnée par la précision de délimitation de la surface inondée. C'est pourquoi, un des objectifs principaux, dans ce paragraphe, est de déterminer, avec le plus de justesse possible, la position des limites de l'inondation. Par ailleurs, comme toute technique de cartographie à partir d'image de télédétection est entachée d'incertitude, le choix est fait d'intégrer ces incertitudes dans le tracé des limites de l'inondation.

Les capteurs satellitaires radar ont une forte sensibilité à la constante diélectrique et à la rugosité de surface des objets observés (Ulaby et al., 1996). Dans ce chapitre, nous partirons de l'hypothèse que les surfaces en eau ont une rugosité très faible (Henry, 2004). En conséquence, celles-ci se comportent comme des réflecteurs spéculaires et se distinguent sur les images avec des rétro-diffusions très faibles.

Pour identifier l'eau sur une image radar, plusieurs méthodes sont envisageables (Cf.§3.1.5). Lorsqu'une seule image est exploitable pour la cartographie d'inondation, la détection de changement n'est évidemment pas adaptée. Par ailleurs, la photo-interprétation implique une part de subjectivité importante due à l'opérateur et la segmentation par contour actif implique la détermination d'un grand nombre de paramètres non liés à la physique du signal radar et aux valeurs de rétrodiffusion de l'eau.

En conséquence, le parti pris est ici fait d'utiliser le seuillage radiométrique pour la détection de l'eau sur image radar car c'est une méthode robuste, relativement simple à mettre en œuvre (Henry, 2004) et qui permet de limiter les incertitudes dues à la subjectivité de l'opérateur. Dans la suite, l'expression « seuillage à la valeur S » désignera la création d'une nouvelle image dont la valeur de chaque pixel est calculée de la manière suivante : la valeur du pixel de l'image seuillée vaut 1 si la valeur du pixel correspondant de l'image radar est inférieure ou égale à S , 0 sinon. A l'issue d'un seuillage, une image binaire est obtenue.

La limite réelle de l'inondation est le plus souvent contenue au sein de pixels partiellement inondés dont la radiométrie est supérieure à celle de l'eau libre. Il est alors important d'identifier ces pixels afin de connaître de façon juste la position des limites de l'inondation. Pour tenir compte, dans une carte d'inondation des pixels totalement et partiellement inondés tout en permettant une distinction entre ces derniers, il a été choisi d'appliquer un double seuillage radiométrique :

- un seuillage par défaut basé sur une valeur S_{\min} qui a pour objectif de détecter les pixels totalement inondés (eau libre),
- un seuillage par excès basé sur une valeur S_{\max} qui vise à détecter les pixels totalement et partiellement inondés.

La détermination des valeurs S_{\min} et S_{\max} résulte des statistiques de rétro-diffusions des principales occupations ou couvertures du sol sur l'image radar : eaux permanentes, prairies, parcelles agricoles, forêts et zones urbaines.

En absence d'effets dus au vent, l'eau libre est relativement homogène sur les images radar et il est possible de supposer que sa radiométrie suit une loi de probabilité Gamma - formule (4.2) - (Ulaby et al., 1986). Cela permet d'estimer un intervalle radiométrique (IQ_{eau}) contenant 90% des valeurs

radiométriques possibles pour l'eau libre (Cf. §4.1). Un seuillage à la borne supérieure de cet intervalle ($Q_{\text{eau}}^{95\%}$) permet de repérer 95 % des valeurs de l'eau libre sans pour autant inclure les valeurs d'autres couvertures du sol de l'image radar. En effet, les prétraitements évoqués au paragraphe 4.1 ont eu pour objectif de permettre la distinction entre la radiométrie de l'eau libre et celle des autres occupations du sol. En conséquence, nous avons choisi de prendre cette valeur ($Q_{\text{eau}}^{95\%}$) comme seuil S_{min} (Figure 4.2, p.86).

La détection des pixels partiellement inondés est une problématique délicate. En effet, selon le type d'occupation du sol présent en bordure d'inondation, la combinaison entre les réponses de l'eau libre et du reste du pixel peut être variable. En présence de végétation émergée en limite d'inondation, des effets de réflexions multiples peuvent se produire (Cf. § 2.2.7.2) et rendre la rétrodiffusion des pixels correspondants difficile à prédire. Par contre, en l'absence de réflexions multiples, il est raisonnable de considérer que la rétrodiffusion d'un pixel à moitié inondée est égale à une moyenne entre celle de l'eau libre et celle du reste du pixel. Ce cas peut se produire par exemple pour un pixel de prairie partiellement inondé.

En conséquence, la valeur S_{max} que nous proposons vise à inclure dans la carte de la zone inondée des pixels de prairie dont au moins la moitié de la surface est en eau. La classe d'occupation du sol « prairie » est adaptée dans ce cas car sa rétro-diffusion est une des plus faibles rencontrées sur image radar, excepté celle de l'eau libre. En conséquence, les pixels de radiométries comprises entre celles de l'eau libre et de la prairie correspondent pour la plupart à des pixels de prairie partiellement inondés.

Pour déterminer la valeur S_{max} , des valeurs représentatives des radiométries de l'eau libre I_{eau} et de la prairie I_{pr} sont préalablement estimées par la moyenne des rétro-diffusions des pixels en eaux permanentes - lacs, gravières et lit mineur de la rivière - et en prairie (non inondée). La valeur S_{max} est choisie comme « moyenne des rétro-diffusions de l'eau libre et de la prairie » (Figure 4.2, p.86) :

$$S_{\text{max}} = \frac{(\bar{I}_{\text{eau}} + \bar{I}_{\text{pr}})}{2} \quad (4.3)$$

A l'issue du double seuillage, deux cartes d'inondation sont obtenues : l'une par défaut, l'autre par excès. La carte par défaut – résultat du seuillage suivant la valeur S_{min} – ne contient que des pixels totalement inondés (à quelques erreurs près, qui seront évoquées dans le paragraphe 4.3). La carte par excès – résultat du seuillage suivant la valeur S_{max} – contient des pixels totalement et partiellement inondés. La zone incluse entre les bordures de ces deux cartes définit une limite floue de l'inondation qui traduit les incertitudes de délimitation de l'étendue inondée dues à la présence de pixels partiellement inondés sur l'image radar.

NB : Dans la suite du document, l'expression « **carte d'inondation** », sans qualificatif, désignera la superposition des cartes d'inondation par défaut et par excès. Elle définit l'étendue inondée avec des limites floues (Figure 4.3, p.86).

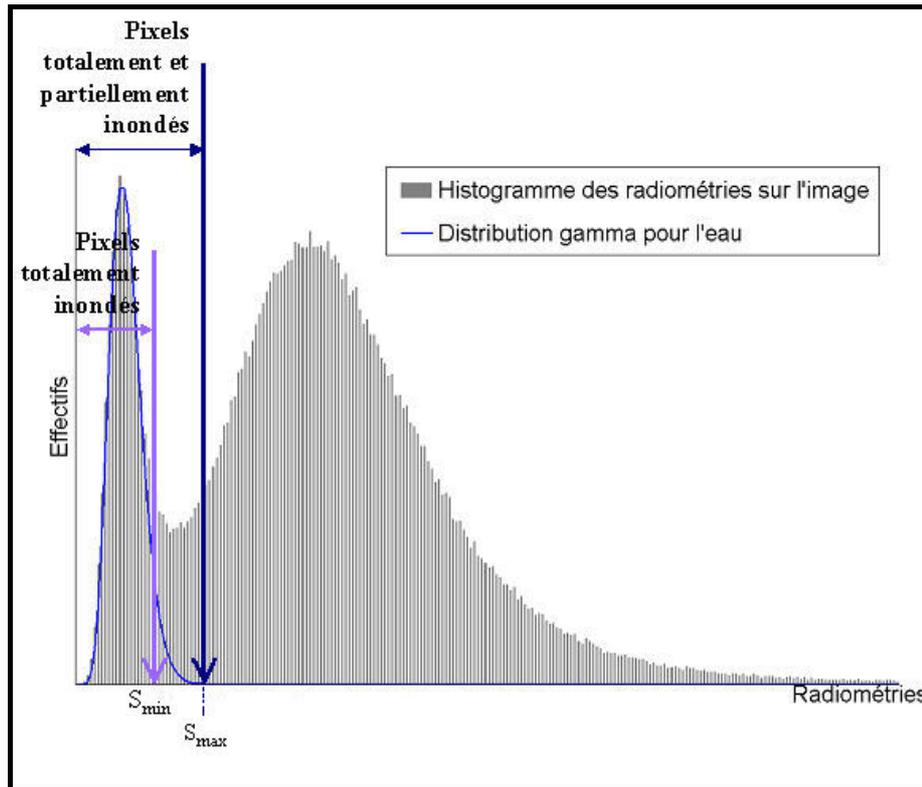


Figure 4.2 : Illustration du double seuillage sur l'histogramme des radiométries de l'image radar.

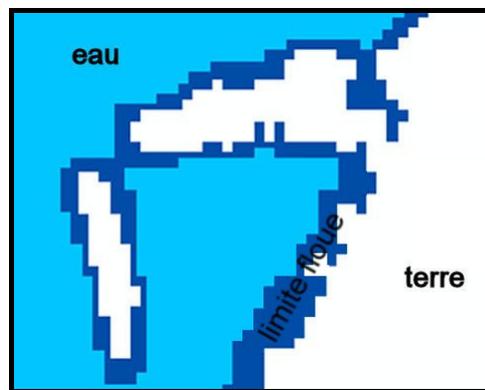


Figure 4.3 : Résultat du double seuillage sur image radar : étendue inondée (en bleu clair) avec une limite floue (en bleu foncé).

4.3 Extraction d'une carte d'inondation certaine

L'objectif de cette section est d'extraire une carte d'inondation sur laquelle la présence ou l'absence d'eau est certaine. La section précédente a permis d'obtenir une carte d'inondation avec des limites floues qui peut être faussée par endroits car la détection de l'eau libre sur image radar est perturbée par plusieurs facteurs (e.g. : ombres, chatoiement, certaines classes d'occupation du sol, ...) (Horritt, 2000).

De façon générale, la cartographie des zones inondées par seuillage radiométrique sur les images radar fait apparaître des mauvaises détections - « sur-détections » ou « sous-détection ». Les sur-détections peuvent être globalement corrigées, mais les sous-détections non.

En conséquence cette section vise à traiter la carte d'inondation afin corriger les sur-détections et d'identifier les zones dans lesquelles des sous-détections sont susceptibles de se produire. Le masquage des zones de sous-détections potentielles doit ensuite permettre d'extraire une « carte d'inondation certaine », i.e. au sein de laquelle l'information eau-non eau est certaine.

4.3.1 Traitement des « sur-détections »

Les « sur-détections » se rencontrent essentiellement hors du champ d'inondation. Elles proviennent principalement d'effets dus au chatoisement et au relief.

Suppression des sur-détections dues au chatoisement

Les effets dus au chatoisement se traduisent principalement sous forme de groupes de pixels isolés hors de l'étendue inondée. Ils sont préjudiciables car responsables d'un bruit important sur la carte d'inondation. Pour supprimer ces effets, nous proposons d'éliminer de la carte d'inondation les groupes de pixels de petite taille.

La carte d'inondation par défaut représente les pixels totalement inondés. Pour qu'un objet puisse être identifié de façon certaine sur une image de Résolution Spatiale Effective RSE, il faut a priori que ses dimensions soient supérieures ou égales à $2RSE$ (Girard & Girard, 1999; Puech et al., 1995), de sorte qu'une cellule de résolution RSE puisse être totalement incluse au sein de cet objet. En conséquence, un groupe de pixel de la carte d'inondation par défaut dont les dimensions sont inférieures à $2RSE$ est susceptible de représenter une étendue d'eau libre réelle ou des effets dus au chatoisement. En raison de cette incertitude concernant la signification des groupes de pixels de dimensions inférieures à $2RSE$ sur la carte d'inondation par défaut, le choix a été fait d'éliminer les groupes de pixels dont l'aire est inférieure à $(2RSE)^2$. Ce filtrage surfacique permet d'obtenir une carte d'inondation par défaut épurée sur laquelle les effets dus au chatoisement ont été corrigés.

Pour épurer la carte d'inondation par excès, nous proposons de supprimer les groupes de pixels de cette carte qui ne coïncident avec aucun pixel de la carte d'inondation par défaut épurée. Cette suppression permet de générer une carte d'inondation par excès épurée.

En résumé, pour supprimer les sur-détections dues au chatoisement, deux phases successives ont été proposées :

- Suppression des groupes de pixels isolés de la carte d'inondation par défaut dont l'aire est inférieure à $(2RSE)^2$.
- Suppression des groupes de pixels isolés de la carte d'inondation par excès qui ne coïncident avec aucun pixel de la carte d'inondation par défaut épurée.

La fusion des cartes d'inondation par défaut et excès épurées permet d'obtenir une carte d'inondation aux limites floues épurée.

Suppression des sur-détections dues au phénomène d'ombrage

Les versants pentus du terrain naturel peuvent échapper à l'onde radar incidente émise par le satellite - phénomène d'ombrage évoqué au paragraphe 2.2.5. Ils apparaissent sur les images avec des radiométries très faibles, proches de celle de l'eau libre. Ils sont en grande partie identifiables grâce aux plans des pentes et azimuts du terrain naturel sur un modèle numérique de terrain.

4.3.2 Traitement des « sous-détections »

Les sous-détections proviennent principalement d'objets qui masquent l'eau – arbres, bâtiments émergés... - ou d'effets de rugosités locales qui augmentent la rétrodiffusion de l'eau libre - e.g. : présence de vent. Dans la suite, nous supposons les effets dus au vent limités afin de nous concentrer sur les erreurs dus aux objets qui masquent l'eau.

Les sous-détections sont des zones déclarées hors d'eau sur la carte d'inondation bien qu'elles soient inondées dans la réalité. Ces erreurs ne peuvent être corrigées sur la carte d'inondation. Par contre, il est possible de cartographier les zones dans lesquelles elles risquent de se produire : zones d'arbres ou de bâtiments.

Les plans d'occupation du sol représentant les arbres et bâtiments peuvent être générés par photo-interprétation sur des images optiques à très haute résolution spatiale acquises hors période de crue (images satellitaires ou photographies aériennes). Ils permettent de construire un masque « arbres-bâtiments ». Appliqué à la carte d'inondation, ce masque permet de définir les zones où la carte d'inondation est certaine et les zones où elle est incertaine, ce qui répond au premier objectif du Chapitre 4 et constitue un premier résultat que nous nommerons par la suite « **carte d'inondation certaine** » (Figure 4.4).

Par ailleurs, il est important de noter que la liste des zones où des sous-détections peuvent se produire, proposée dans ce paragraphe n'est pas exhaustive. Nous avons volontairement sélectionné les sources d'erreur les plus fréquentes. Lorsque d'autres sources d'erreurs sont présentes sur un site d'étude, il est nécessaire de les intégrer dans la démarche.

4.3.3 Carte d'inondation certaine

A l'issue de la correction des sur-détections et de l'identification des zones dans lesquelles des sous-détections sont susceptibles de se produire, nous obtenons une carte d'inondation certaine, incomplète par rapport à l'étendue inondée réelle, mais au sein de laquelle chaque pixel déclaré inondée l'est effectivement dans la réalité.

La carte d'inondation certaine sera utilisée dans la suite d'une part pour extraire les bordures d'inondation pertinentes pour une estimation du niveau d'eau et d'autre part comme donnée de calage d'un modèle hydraulique.

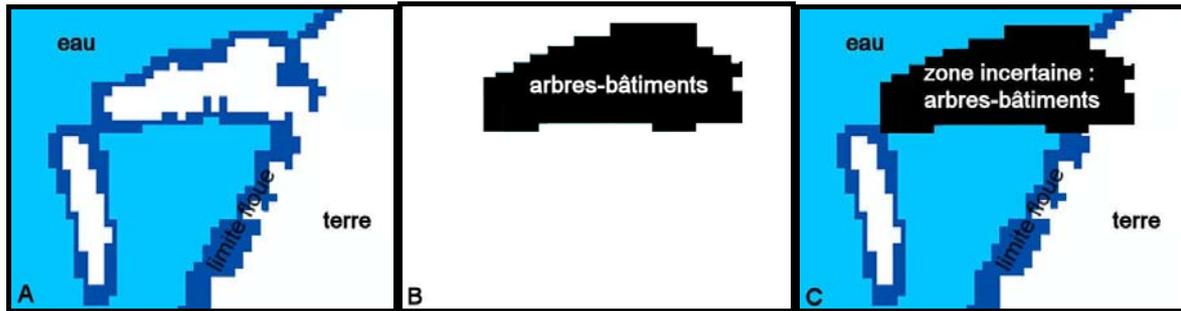


Figure 4.4 A à C : Extraction d'une carte d'inondation certaine.

A : Carte d'inondation radar aux limites floues.

B : Masque « arbres-bâtiments » = zone où l'information est incertaine.

C : Croisement de A et B = Carte d'inondation certaine aux limites floues.

4.4 Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau

Cette section vise à extraire de la carte d'inondation certaine des bordures d'inondations qui permettent d'estimer des niveaux d'eau, avec des incertitudes raisonnables, par croisement avec un modèle numérique de terrain. Grâce aux traitements effectués dans la section précédente, il peut être supposé que les limites floues de la carte d'inondation certaine incluent les limites réelles de l'inondation, aux incertitudes spatiales près.

Par ailleurs, la position de ces bordures floues ne renseigne précisément sur le niveau d'eau que dans des zones raisonnablement planes. De plus, en raison d'une sensibilité surface en eau/niveau d'eau faible, les eaux permanentes sont peu utiles pour une estimation des niveaux d'eau. C'est pourquoi, les zones à forte variabilité altimétrique et les zones d'eaux permanentes seront considérées non pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

Cette section est structurée en trois étapes. La première vise à extraire les limites floues de la carte d'inondation et prendre en compte les incertitudes spatiales de positionnement de la limite d'inondation afin d'obtenir de nouvelles limites floues au sein desquelles la limite réelle de l'inondation est incluse. La seconde vise à identifier les zones pour lesquelles les limites floues ne permettent pas d'estimer des niveaux d'eau de façon précise afin de pourvoir par la suite les supprimer de l'analyse. La troisième vise à extraire les limites floues pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

4.4.1 Extraction des bordures floues et prise en compte de l'incertitude spatiale de positionnement de la limite d'inondation

Chaque pixel de la carte d'inondation certaine peut prendre la valeur : « terre », « eau », « limite floue », ou « zone incertaine » (Figure 4.5A). En conséquence, l'extraction des pixels ayant la valeur « limite floue » sur la carte d'inondation certaine permet d'obtenir les limites floues (Figure 4.5B).

Par ailleurs, les limites réelles d'une inondation ne peuvent être localisées de façon parfaite à partir d'une image radar. C'est pourquoi les bordures de la carte d'inondation ont une épaisseur, qui traduit l'incertitude « radiométrique » de positionnement des limites d'inondation, liée à la présence de pixels partiellement inondés (Cf. § 4.2). L'incertitude sur le positionnement des limites de l'inondation est également liée à des incertitudes spatiales :

- La Résolution Spatiale Effective (RSE) des images radar en intensité est différente de la taille du pixel sur l'image - résultat de l'échantillonnage d'une image complexe. La carte d'inondation étant le résultat d'un seuillage à l'échelle du pixel, la position des bordures de la carte d'inondation n'est potentiellement connue qu'à $RSE/2$ près¹⁰.
- Les images radar, pour pouvoir être croisées avec d'autres données (e.g. : MNT) doivent être géoréférencées (Cf. §2.2.5). A l'issue du géoréférencement, les coordonnées géographiques des pixels de l'image radar et donc des segments informatifs ne sont connues qu'à la Précision du Géoréférencement (PG) près.

Ces incertitudes spatiales doivent être prises en compte lors de l'estimation des niveaux d'eau. Pour cela, les bordures floues sont dilatées à l'aide d'une zone tampon dont l'épaisseur est $V = RSE/2 + PG$ (Figure 4.5C).

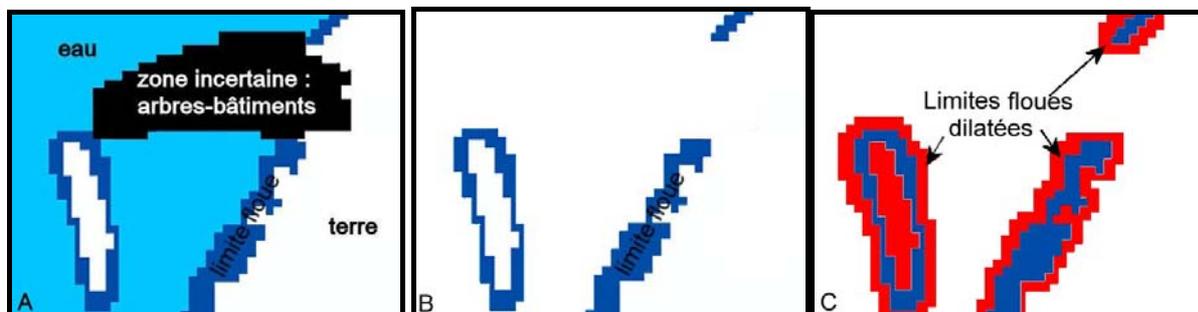


Figure 4.5 A à C : De la carte d'inondation certaine aux bordures floues dilatées

A : Carte d'inondation certaine

B : Limites floues de la carte certaine

C : Limites floues dilatées à l'aide d'une zone tampon (en rouge) qui traduit les incertitudes spatiales liées au géoréférencement et à la résolution spatiale effective de l'image radar.

¹⁰ Le coefficient $\frac{1}{2}$ provient du fait que la RSE est supposée correspondre aux dimensions d'une zone d'incertitude dont le pixel est le centre.

NB : Les incertitudes de positionnement de la limite d'inondation ayant été prises en compte au sein des limites floues dilatées, il peut être raisonnablement supposé que les limites floues dilatées incluent les limites réelles de l'inondation.

4.4.2 Identification des limites d'inondation non pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau

Nous proposons dans la suite d'extraire, au sein des bordures floues, les seules parties qui sont pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau par croisement avec un MNT fin. Pour cela, nous allons éliminer, au sein des bordures floues, les parties qui ne renseignent pas de façon précise sur les niveaux d'eau.

Les zones à forte variabilité altimétrique

L'incertitude d'estimation du niveau d'eau par croisement entre des données images et un MNT dépend d'une part de la précision spatiale de localisation de la limite de l'inondation et d'autre part de la variabilité altitudinale du terrain. En particulier, au droit des structures topographiques - talus, digues, routes et voies ferrées surélevées - l'incertitude peut s'avérer trop importante (Figure 4.6, p.91). En conséquence, les abords des structures topographiques de la plaine d'inondation (talus, digues, routes et voies ferrées surélevées) ne permettent pas d'estimer des niveaux d'eau de façon précise. C'est pourquoi, seules les zones exemptes de structures topographiques seront conservées.

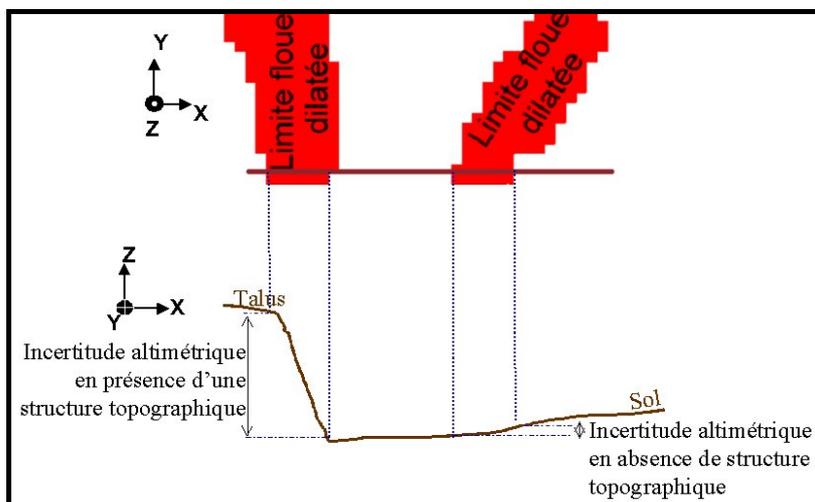


Figure 4.6 : Influence des structures topographiques sur l'incertitude d'estimation des niveaux d'eau, compte tenu de l'épaisseur des limites floues sur la carte d'inondation certaine.

Les eaux permanentes

Les eaux permanentes - gravières, lacs et lit mineur de la rivière - doivent être considérées non pertinentes pour une estimation du niveau d'eau. En effet, à cause de la présence de berges avec des pentes fortes en bordures des eaux permanentes, une variation du niveau d'eau importante ne donnera le plus souvent lieu qu'à une variation faible de la surface en eau. De plus, l'eau présente dans les lacs et gravières ne participe pas nécessairement à l'écoulement de l'inondation.

Les plans d'information contenant les gravières, les lacs et le lit mineur de la rivière peuvent être générés à partir de photographies aériennes, de données topographiques ou d'images radar acquises hors période de crue.

A l'issue de l'identification des zones de forte variabilité altimétrique et d'eaux permanentes, est obtenue un masque représentant les zones qui ne permettent pas d'estimer de façon précise des niveaux d'eau à partir des limites floues dilatées de l'inondation. Ce masque est une carte binaire, indiquant pour chaque pixel si celui-ci est pertinent (valeur 1) ou non pertinent (valeur 0) pour une estimation des niveaux d'eau.

NB : Dans la suite du document, ce masque sera dénommé « **masque niveau** ».

4.4.3 Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

L'application du masque niveau aux bordures floues dilatées permet d'extraire les bordures floues pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau (Figure 4.7D).

NB : Ces bordures pertinentes, appelées « **segments informatifs** » dans la suite de la méthode, seront utilisées pour l'estimation des niveaux d'eau. Malgré une épaisseur non nulle des bordures pertinentes, la dénomination « segments informatifs » a été choisie car ceux-ci renseignent, de façon discontinue, sur la position de la limite d'inondation qui est en théorie une ligne.

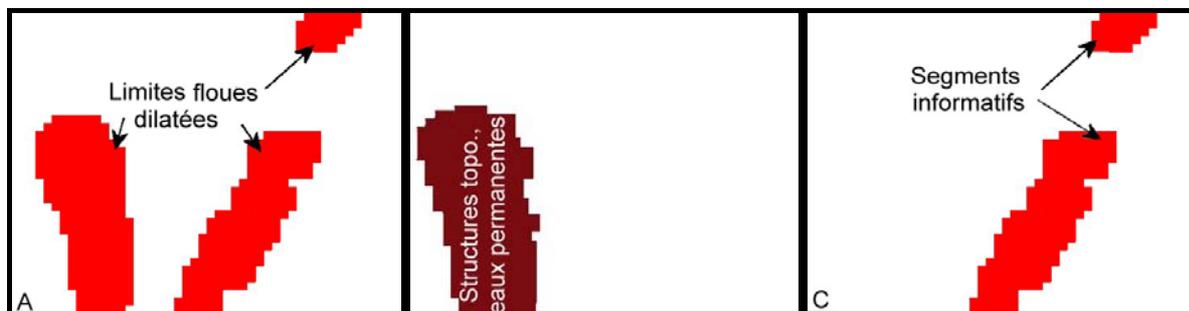


Figure 4.7 A à C : Des limites floues dilatées aux segments informatifs.

A : Limites floues dilatées.

B : Masque niveau : structures topographiques et eaux permanentes.

C : Segments informatifs résiduels après application du masque niveau.

Par ailleurs, pour pouvoir exploiter pertinemment les segments informatifs lors de l'estimation des niveaux d'eau, les critères de taille suivants sont retenus : une taille minimale pour que le segment soit représentatif vis à vis de l'image radar et une taille maximale pour que le niveau d'eau N_e^i puisse y être considéré sensiblement constant.

4.5 Conclusion

La méthode d'exploitation d'une image satellitaire radar présentée vise à extraire une carte d'inondation certaine et les bordures de cette carte pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

L'approche cartographique par seuillage radiométrique sur image radar est relativement conventionnelle (Henry, 2004). La carte de l'inondation ainsi obtenue est localement fautive ou très imprécise. En conséquence, pour pouvoir utiliser celle-ci pour le calage d'un modèle hydraulique et l'estimation des niveaux d'eau (par croisement entre limites de l'inondation et MNT), il est nécessaire de n'utiliser que sa partie la plus certaine et la plus pertinente.

L'innovation de la méthode proposée réside dans l'analyse fine du caractère informatif d'une image radar pour l'étude des inondations. Les deux résultats marquant de cette méthode de cartographie orientée vers l'hydraulique sont :

- une carte d'inondation certaine qui sera utilisée au Chapitre 6 dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique,
- des bordures d'inondations pertinentes (segments informatifs) qui sont le point de départ de la méthode d'estimation des niveaux d'eau qui sera présentée au Chapitre 5.

Par ailleurs, en dehors des prétraitements de l'image qui sont réalisés en partie manuellement sous SIG, l'ensemble des techniques proposées dans le Chapitre 4 est automatisé sous forme d'un programme en langage de programmation d'ERDAS Imagine®. Pour résumer ce chapitre, la Figure 4.8 synthétise les différentes techniques mises en œuvre et les principaux résultats obtenus.

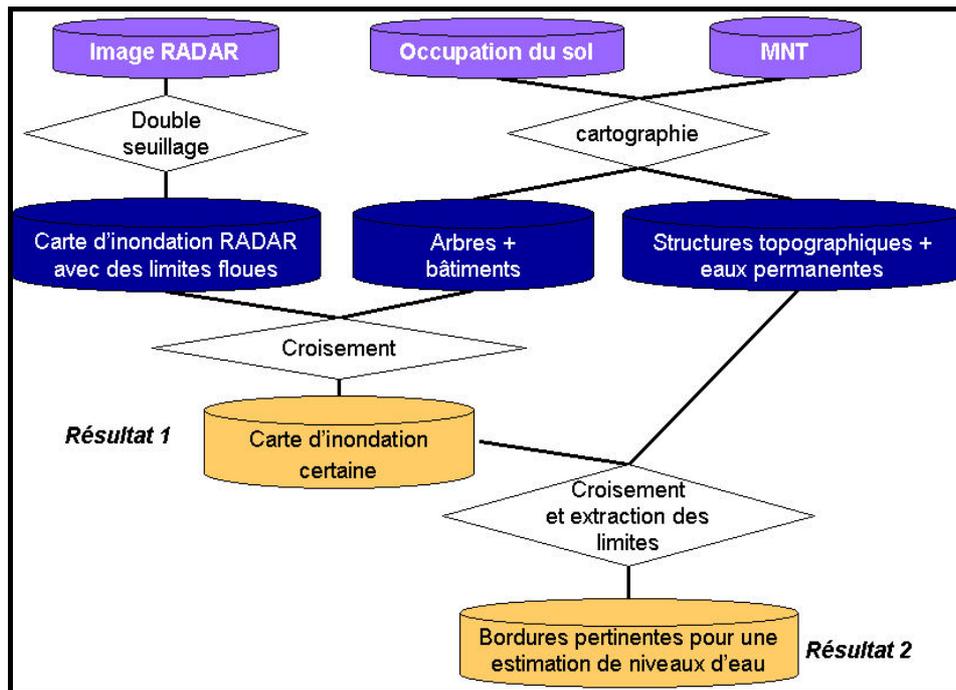


Figure 4.8 : Schéma de principe de l'extraction d'une carte d'inondation certaine et des bordures d'inondation pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

Chapitre 5.

Estimation des niveaux d'eau

Sommaire

5.1	Estimation primaire des niveaux d'eau par croisement entre les segments informatifs et un MNT à haute résolution spatiale	96
5.2	Construction d'une hiérarchie hydraulique dans la plaine d'inondation	96
5.2.1	Hiérarchie hydraulique monodimensionnelle	97
5.2.2	Hiérarchie hydraulique « bidimensionnelle »	99
5.3	Mise en cohérence hydraulique	102
5.3.1	Hypothèses mises en jeu	102
5.3.2	Concepts et principes de l'algorithme	102
5.3.3	La résolution des conflits	103
5.3.4	Le resserrement des estimations de niveau d'eau	104
5.4	Conclusion	108

Ce chapitre est inspiré d'un article publié dans les actes du colloque SAGEO'2005 (Hostache et al., 2005) et d'un article en cours de révision dans la revue *Téledétection* (Hostache & Puech, In press).

Il vise à quantifier la distribution spatiale des niveaux d'eau dans la plaine d'inondation à la date d'acquisition d'une image satellitaire. L'objectif est de valoriser les images satellitaires de crue au-delà de l'extraction des étendues inondée et de fournir des informations utiles à la modélisation hydraulique. La méthode proposée vise à estimer des niveaux d'eau en de nombreux points de la plaine (pour chaque segment informatif), sous forme d'intervalles au sein desquels le niveau d'eau réel est inclus et avec des précisions compatibles avec des applications en hydraulique fluviale.

Les segments informatifs (Cf. Chapitre 4) constituent le point de départ de ce chapitre. La méthode proposée repose dans un premier temps sur un croisement des segments informatifs avec un MNT fin afin d'obtenir une estimation primaire de niveaux d'eau par segment informatif.

Pour parvenir à estimer des niveau d'eau de façon précise à partir de photographies aériennes de crue et d'un MNT fin, (Raclot, 2003a) a proposé un algorithme de mise en cohérence hydraulique qui repose sur le principe suivant lequel la charge hydraulique ne peut croître de l'amont vers l'aval. En plaine d'inondation, avec des vitesses d'écoulements faibles, la décroissance de la charge hydraulique peut être assimilée à une décroissance des niveaux d'eau de l'amont vers l'aval. Pour imposer des contraintes entre niveaux d'eau successifs, il est nécessaire de définir une hiérarchie hydraulique des segments informatifs (ensemble de relation d'ordre amont-aval), qui repose sur les sens et directions des écoulements dans la plaine inondée à l'instant d'acquisition de l'image satellitaire. C'est pourquoi, dans une deuxième section de ce chapitre, une méthode de détermination d'une hiérarchie hydraulique est proposée. La troisième section présente l'algorithme de mise en cohérence hydraulique, en application aux estimations primaires des niveaux d'eau, les contraintes de décroissance du niveaux d'eau étant appliquées aux estimations primaires s'il y a relation d'ordre amont-aval.

5.1 Estimation primaire des niveaux d'eau par croisement entre les segments informatifs et un MNT à haute résolution spatiale

Cette section vise à estimer le niveau d'eau au droit de chaque segment informatif par croisement avec un MNT fin.

La position de la limite réelle d'une inondation ne peut être connue de façon parfaite à partir d'une image radar. C'est pourquoi les segments informatifs ont une épaisseur qui traduit les incertitudes de positionnement de la limite d'inondation. Ces incertitudes se répercutent sur les estimations de niveaux d'eau lors du croisement entre segments informatifs et données topographiques. En conséquence, les estimations des niveaux d'eau issues de ce croisement sont obtenues sous forme d'intervalles.

NB : Dans la suite, nous nommerons **estimations de niveaux d'eau** ces intervalles.

Les segments informatifs tenant compte à la fois des incertitudes radiométriques et spatiales imposées par les données de télédétection, l'hypothèse suivante peut être faite : « **les limites d'inondations réelles sont supposées traverser l'ensemble des segments informatifs** ».

En conséquence, les altitudes du terrain au sein d'un segment informatif fournissent des valeurs possibles du niveau d'eau : N valeurs de niveau d'eau possibles, où N est le nombre de pixels du MNT inclus dans le segment informatif.

Par ailleurs, l'utilisation d'un MNT implique une incertitude liée à sa précision altimétrique. La prise en compte de cette dernière est réalisée en affectant à chaque valeur possible du niveau d'eau l'incertitude altimétrique du MNT. Il en résulte, pour chaque segment informatif SI_i , un nouvel ensemble de valeurs possibles du niveau d'eau, dont les valeurs extrêmes définissent l'intervalle des niveaux d'eau possibles $IN^i = [N_{\min}^i, N_{\max}^i]$.

Ces estimations dites « primaires » proviennent d'un croisement entre les segments informatifs et le MNT, sans considération pour les phénomènes mis en jeu dans un écoulement d'inondation. C'est pourquoi, une phase de mise en cohérence hydraulique des estimations primaires est proposée dans la suite. Celle-ci vise à contraindre les estimations primaires grâce à une logique d'écoulement hydraulique afin de réduire les incertitudes.

5.2 Construction d'une hiérarchie hydraulique dans la plaine d'inondation

L'algorithme de mise en cohérence hydraulique qui sera proposé à la section 5.3 impose une décroissance des niveaux d'eau en suivant le sens de l'écoulement, c'est à dire une inégalité - Niveau(a) \geq Niveau(b) - entre deux estimations des niveaux d'eau aux points a et b si a est à l'amont de b . Pour être appliqué aux segments informatifs, l'algorithme nécessite la définition d'une hiérarchie hydraulique, constituée de relations d'ordre amont-aval entre les segments informatifs.

Chaque combinaison de deux segments informatifs n'étant pas nécessairement affectée d'une relation d'ordre, l'ensemble de ces relations peut être partiel.

La détermination des relations d'ordre est particulièrement importante car elle conditionne la réduction des incertitudes d'estimation des niveaux d'eau.

Sur une image radar les directions d'écoulement dans la plaine ne peuvent être observées directement, contrairement au cas des photographies aériennes (Raclot, 2003b). Pour compenser cette lacune la construction d'une hiérarchie hydraulique va exploiter des données exogènes et si nécessaire faire appel à une phase d'expertise hydraulique.

La méthode quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau proposée dans ce chapitre vise en particulier à fournir des informations utiles au calage d'un modèle hydraulique. En conséquence, la hiérarchie hydraulique doit être cohérente avec le schéma d'écoulement du modèle hydraulique exploité. En lien avec le type de modèle utilisé (1D, 2D), la définition de la hiérarchie hydraulique repose sur des hypothèses différentes concernant le schéma de circulation des eaux. Dans cette section, nous considérerons deux cas possibles : soit le schéma d'écoulement dans la plaine est supposé monodimensionnel, soit il est supposé bidimensionnel.

En lien avec la perspective d'une chaîne de traitement automatisée, le modèle hydraulique qui sera exploité au Chapitre 6 est monodimensionnel. C'est pourquoi, nous allons dans un premier temps considérer la définition d'une hiérarchie hydraulique basée sur un schéma d'écoulement monodimensionnel.

5.2.1 Hiérarchie hydraulique monodimensionnelle

Considérons la géométrie d'un modèle monodimensionnel, constituée de profils en travers en trois dimensions représentant la topographie de la plaine (5.2). Une modélisation 1D suppose que l'écoulement se fait dans la plaine perpendiculairement à chaque profil en travers (Figure 5.1). De plus, en supposant qu'il n'y a pas d'apport important dans la plaine d'inondation en dehors de la rivière principale, il peut être supposé que l'écoulement a lieu d'un profil à l'autre, de proche en proche depuis le profil amont jusqu'au profil aval.

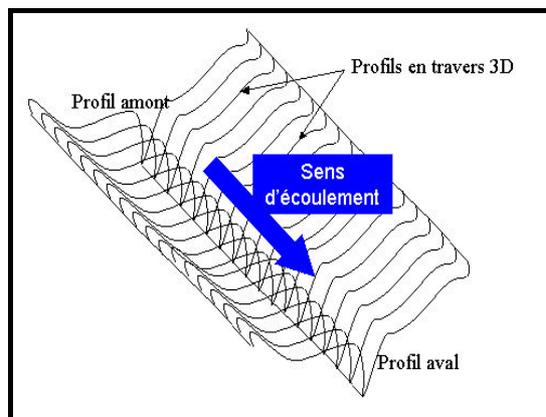


Figure 5.1 : Géométrie d'un modèle hydraulique 1D et sens d'écoulement associé.

La géométrie d'un modèle monodimensionnel permet ainsi de connaître les sens et direction de l'écoulement dans l'ensemble de la plaine, et en particulier au droit de chaque segment informatif (Figure 5.2A).

Par ailleurs, au sein d'un segment informatif, le niveau d'eau n'est pas nécessairement constant. En effet, le niveau d'eau décroît au sein du segment informatif suivant le sens et la direction de l'écoulement. Cette décroissance est pénalisante dans la méthode si la dimension du segment informatif dans la direction de l'écoulement ne permet pas d'y supposer le niveau d'eau constant, compte tenu d'une incertitude attendue sur l'estimation du niveau d'eau. La connaissance de la direction d'écoulement au droit d'un segment informatif permet de découper celui-ci, perpendiculairement à la direction d'écoulement, pour que sa longueur (le long de l'écoulement) soit suffisamment petite pour pouvoir y supposer le niveau d'eau constant (Figure 5.2B). Conformément à ceux annoncés au paragraphe 4.4.3, les critères de longueur de découpage des segments informatifs suivants sont proposés :

- une longueur minimale pour que le segment découpé soit représentatif vis à vis de l'image radar,
- une longueur maximale pour que le niveau d'eau N_e^i puisse y être considéré sensiblement constant.

Grâce aux sens d'écoulement définis par la géométrie du modèle 1D, il est ensuite possible de définir une hiérarchie hydraulique des segments informatifs découpés (Figure 5.2C).

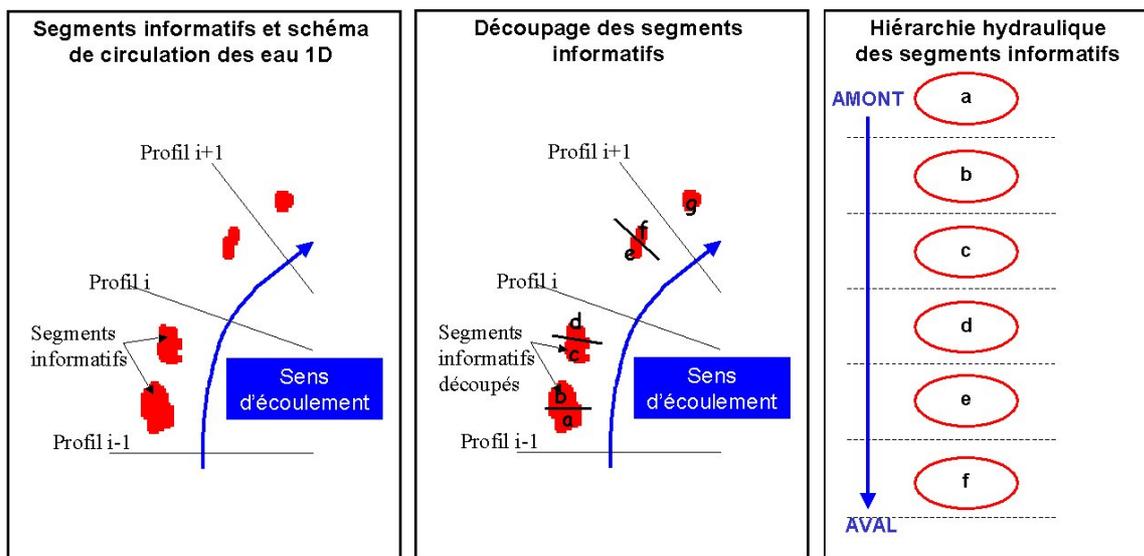


Figure 5.2 A à C : Définition de la hiérarchie hydraulique des segments informatifs à partir de la géométrie d'un modèle hydraulique 1D.

En généralisant cette démarche à l'ensemble de la plaine d'inondation, on construit une hiérarchie hydraulique des segments segment informatifs, c'est à dire un ensemble de relation d'ordre amont-aval entre ces segments. Dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, la hiérarchie hydraulique est linéaire, c'est à dire qu'elle est constituée d'une suite de segment informatifs interconnectés. Cela implique que chaque couple de segments informatifs de la plaine d'inondation est affecté d'une relation d'ordre amont-aval.

5.2.2 Hiérarchie hydraulique « bidimensionnelle »

Dans le cas où l'hypothèse d'un écoulement monodimensionnel dans la plaine d'inondation n'est pas recevable, la méthode de construction d'une hiérarchie hydraulique que nous proposons fait appel à une phase d'expertise hydraulique. La Figure 5.3 (p.101) explicite le schéma général de la construction de cette hiérarchie hydraulique, qui s'appuie sur :

- les segments informatifs,
- des données exogènes de courbes de niveau, d'infrastructures (routes, voies de chemin de fer...) et d'occupation du sol (urbain, forêt),
- la carte d'inondation certaine issue de l'image radar.

La construction passe par plusieurs étapes : 1) définition d'unités hydrauliques, 2) détermination des sens d'écoulements à l'intérieur de ces unités, pour en déduire 3) des relations d'ordre amont-aval entre unités hydrauliques. L'ensemble des sens d'écoulement au sein des unités et les relations d'ordre entre unités définissent un schéma de circulation des eaux dans la plaine qui, appliqué aux segments informatifs permet de construire 4) une hiérarchie hydraulique de ces segments.

5.2.2.1 *Délimitation des unités hydrauliques*

La plaine est découpée en « unités hydrauliques » UH qui sont définies comme suit :

- Ce sont des zones dans lesquelles une hypothèse d'écoulement mono-dimensionnel (1D) est raisonnable.
- Elles sont délimitées par les obstacles potentiels à l'écoulement.

De plus, chaque segment informatif fait partie d'une UH, et il peut y avoir plusieurs segments dans la même UH.

Les obstacles potentiels à l'écoulement qui sont utilisés pour délimiter les UH (car invalidant localement l'hypothèse d'écoulement 1D) (Figure 5.3 C) sont :

- les Zones Émergées qui isolent l'une de l'autre deux parties de l'étendue inondée, appelées dans la suite ZEI (Figure 5.3 A),
- les infrastructures qui perturbent l'écoulement hydraulique (digues, talus, voies de communication surélevées, haies d'arbres), appelées dans la suite INFH (Figure 5.3 B).

Les ZEI peuvent être interprétées sur la carte d'inondation, en dehors des zones urbaines et de végétation haute. Les INFH peuvent être obtenues à partir de données topographiques fines et d'images optiques à très haute résolution spatiale (métrique ou centimétrique).

5.2.2.2 *Détermination des sens d'écoulement à l'intérieur des unités hydrauliques*

Pour définir un schéma de circulation des eaux, nous proposons de déterminer des lignes d'écoulement préférentiel au sein des unités hydrauliques qui vont fournir le sens et la direction générale de l'écoulement.

Au sein d'une UH, on considère que l'écoulement est principalement guidé par la topographie : suivant les lignes de plus grande pente, perpendiculaires aux courbes de niveaux (Figure 5.3 C et D).

La ligne d'écoulement préférentiel est définie par photo interprétation des courbes de niveau comme direction dominante des flux potentiels. Le but de cette phase n'est pas une délimitation parfaite d'une ligne d'écoulement représentative mais la caractérisation 1) des bordures amont et aval de chaque unité hydraulique, 2) de la direction générale du flux et 3) de la hiérarchie hydraulique (type amont-aval) des segments informatifs qui sont à l'intérieur de cette unité.

Cette méthode est valable en phase de décrue pendant laquelle les écoulements sont plutôt convergents vers le lit mineur et guidés par les lignes de plus grande pente. Par contre, en période de montée des eaux, les écoulements sont plutôt divergents du lit mineur et plus complexes, ce qui les rend difficiles à prédire. En effet, dans ce cas, les sens et directions d'écoulement sont en particulier conditionnés par les niveaux d'eau en lit mineur et les points de débordement du lit mineur qu'une carte d'inondation et des données topographiques seules ne permettent pas de déterminer.

5.2.2.3 Définition des relations d'ordres entre unités hydrauliques

Pour déterminer les liens hydrauliques entre unités, nous allons considérer les informations internes aux unités successives issues de l'étape précédente (directions des flux internes, bordures amont et aval) ainsi que les informations sur les interfaces entre unités : possibilité d'écoulement, obstacles émergés ou immergés, en se basant sur les ZEI et les INFH (Cf. § 5.2.2.1).

Les ZEI correspondent à des obstacles et empêchent un lien hydraulique entre unités voisines. Le rôle des INFH dépend de leur état de submersion : celles qui apparaissent immergées sur la carte d'inondation satellitaire peuvent être qualifiées de façon certaine d'immergées et permettent un lien hydraulique. Par contre celles que la tache radar ne recouvre pas ne peuvent être qualifiées de façon certaine d'émergées, suite aux perturbations possibles du signal radar par la végétation, l'habitat etc.

Pour ne pas imposer de relation d'ordre de façon arbitraire, une connexion entre deux unités hydrauliques n'est considérée utile dans le schéma de circulation des eaux que s'il y a continuité des sens et directions d'écoulement entre ces deux unités, i.e. lorsque la bordure amont de l'une coïncide avec la bordure aval de l'autre. Il y aura connexion entre deux unités voisines, seulement si la bordure aval de l'unité amont et la bordure amont de l'unité aval coïncident avec une même infrastructure hydraulique immergée.

Appliquée de proche en proche à travers la plaine, cette approche permet de construire un ensemble de relations d'ordre entre les unités hydrauliques qui définit le schéma de circulation des eaux (Figure 5.3 E)

5.2.2.4 La hiérarchie des segments informatifs

Chaque segment informatif est situé au sein d'une grande unité hydraulique (Cf. §5.2.2.1) et peut par conséquent être associé à cette unité. Rappelons par ailleurs qu'il peut y avoir plusieurs segments dans la même unité.

Grâce à la connaissance du sens d'écoulement interne à cette unité (Cf. §5.2.2.2.), il est possible de définir les relations d'ordre entre segments informatifs de la même unité hydraulique. Par ailleurs, les segments informatifs d'unités voisines peuvent hériter des relations d'ordre entre ces unités. Ces deux ensembles d'informations permettent de construire une hiérarchie des segments informatifs, c'est à

dire un ensemble de relation d'ordre partiel puisque tout couple de segments n'est pas affecté d'une relation d'ordre. La Figure 5.3 F représente symboliquement la hiérarchie obtenue.

Cette hiérarchie entre les segments va permettre d'organiser les calculs de propagation de contraintes entre niveaux d'eau pour un resserrement des intervalles d'estimation.

Étape complémentaire : découpage des segments informatifs « trop longs »

Comme nous l'avons indiqué au paragraphe, 5.2.1, le niveau d'eau n'est pas nécessairement constant au sein d'un segment informatif. En effet, suivant l'hypothèse d'écoulement 1D au sein d'une UH, le niveau d'eau décroît au sein du segment informatif suivant le sens et la direction de l'écoulement. Pour obtenir des segments informatifs au sein desquels le niveau d'eau peut être supposé sensiblement constant, nous proposons, comme au paragraphe 5.2.1, de découper ces derniers en sous-segments informatifs perpendiculairement à la direction d'écoulement, conformément aux critères de taille proposés au paragraphe 4.4.3. Ce découpage repose sur l'hypothèse d'écoulement 1D au sein de chaque unité hydraulique. La hiérarchie des segments informatifs qui sera utilisée dans la suite de la méthode est celle construite à partir des sous-segments ainsi découpés.

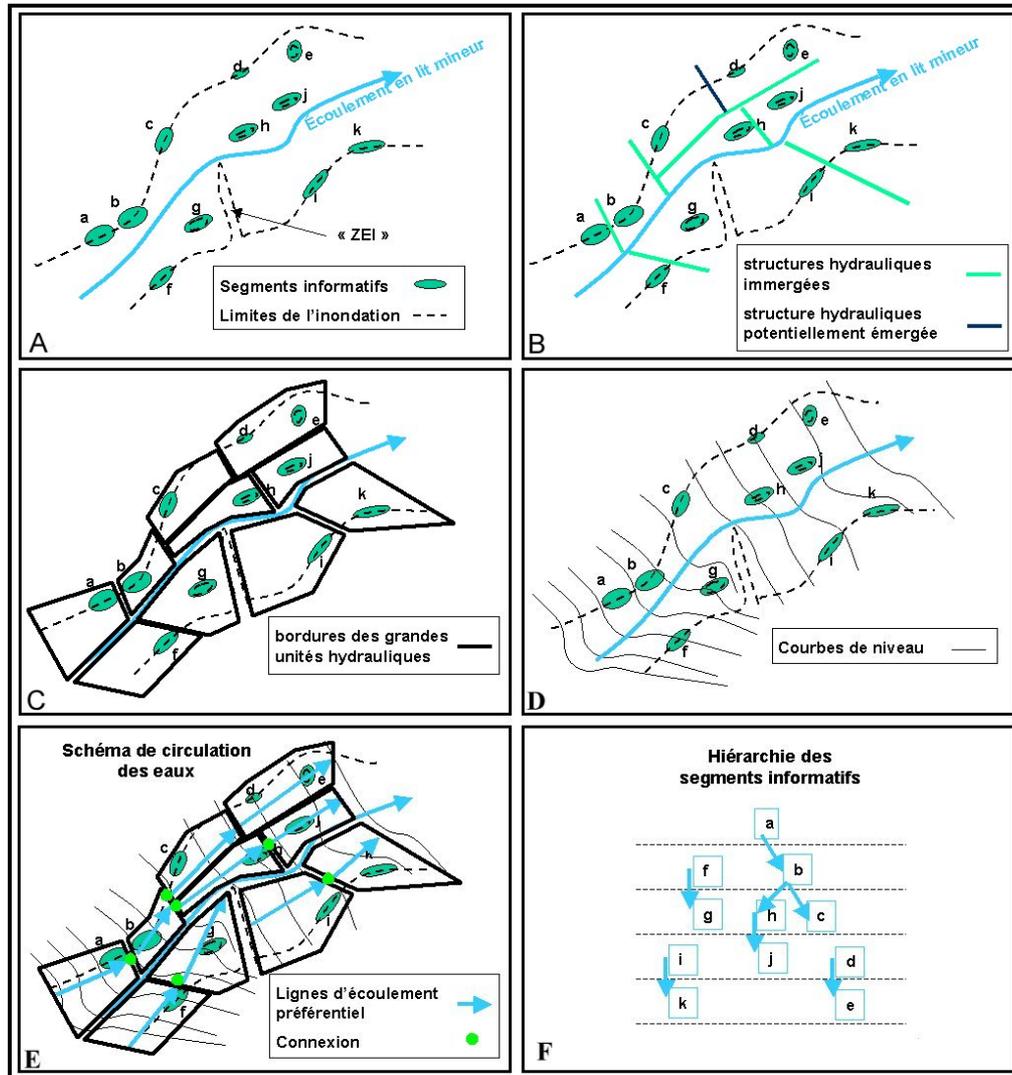


Figure 5.3 A à F : Étapes de la construction de la hiérarchie hydraulique.

5.3 Mise en cohérence hydraulique

Cette section vise à rendre les estimations primaires de niveaux d'eau cohérentes avec le schéma de circulation des eaux et restreindre les intervalles d'estimation.

Les points de départ de la mise en cohérence hydraulique sont la hiérarchie hydraulique des segments informatifs (§ 5.2), qui définit les relations d'ordre amont-aval entre les segments informatifs, et les estimations primaires de niveaux d'eau (§ 5.3), sous la forme d'un intervalle de niveaux d'eau possibles pour chaque segment informatif : $IN^i = [N_{\min}^i, N_{\max}^i]$.

5.3.1 Hypothèses mises en jeu

L'algorithme de mise en cohérence hydraulique repose sur les deux hypothèses suivantes :

- les estimations primaires de niveaux d'eau extraites de l'image radar sont fiables, pour l'ensemble des segments informatifs, compte tenu des incertitudes et des hypothèses formulées, (H1)
- les estimations de niveau d'eau doivent être cohérentes avec le schéma de circulation des eaux dans la plaine à la date d'acquisition de l'image satellitaire. (H2)

L'hypothèse (H1) implique que pour tout segment informatif SI_i , le niveau d'eau réel au sein de ce dernier est inclus dans l'intervalle IN^i . Dès lors, seules les valeurs comprises entre les bornes N_{\max}^i et N_{\min}^i de l'intervalle d'estimation du niveau d'eau local sont potentiellement justes. Par conséquent, les valeurs N_{\max}^i et N_{\min}^i sont respectivement des **majorants** et **minorants** du niveau d'eau réel au sein du segment informatif SI_i .

Notons que ces estimations ont été extraites indépendamment les unes des autres et peuvent par conséquent être considérées comme indépendantes. Or l'hypothèse (H2) implique des dépendances spatiales entre niveaux d'eau, imposées par les écoulements hydrauliques. La prise en compte de ces dépendances doit permettre d'obtenir de nouvelles estimations, cohérentes avec un écoulement hydraulique en plaine d'inondation. Elle revient à extraire, au sein des intervalles d'estimation primaire des niveaux d'eau, les valeurs qui satisfont la décroissance des niveaux d'eau de l'amont vers l'aval, sous l'hypothèse que les vitesses d'écoulement sont faibles dans la plaine. Les autres valeurs seront considérées incohérentes d'un point de vue hydraulique et éliminées des intervalles d'estimation afin d'obtenir de nouveaux intervalles, restreints.

5.3.2 Concepts et principes de l'algorithme

L'algorithme de mise en cohérence hydraulique recherche des estimations « finales » de niveaux d'eau qui répondent au système de contraintes suivant :

- elles sont incluses dans les intervalles d'estimation primaires, (C1)
- elles répondent aux contraintes de décroissance amont-aval imposées par un écoulement hydraulique. (C2)

Parfois, le système de contraintes défini par (C1) et (C2) n'a pas de solution. On parle alors de conflit entre estimations des niveaux d'eau : il n'existe pas de valeurs incluses dans les intervalles

d'estimation qui permettent de satisfaire le principe de décroissance des niveaux d'eau en suivant le sens d'écoulement (Figure 5.4).

Avec les notations définies au paragraphe 5.1, il y a conflit entre les estimations des niveaux d'eau correspondantes aux segments informatifs SI_i et SI_j si :

$$SI_i \text{ est à l'amont de } SI_j \text{ et } N_{\min}^j > N_{\max}^i \quad (5.1)$$

En effet, dans la relation (5.1), aucune des valeurs de niveau d'eau possibles incluses dans les intervalles d'estimations brutes de niveaux ne permet de respecter la contrainte (C2). Les conflits peuvent en particulier être dus aux incertitudes sur les données topographiques ou à des erreurs locales de tracé des segments informatifs.

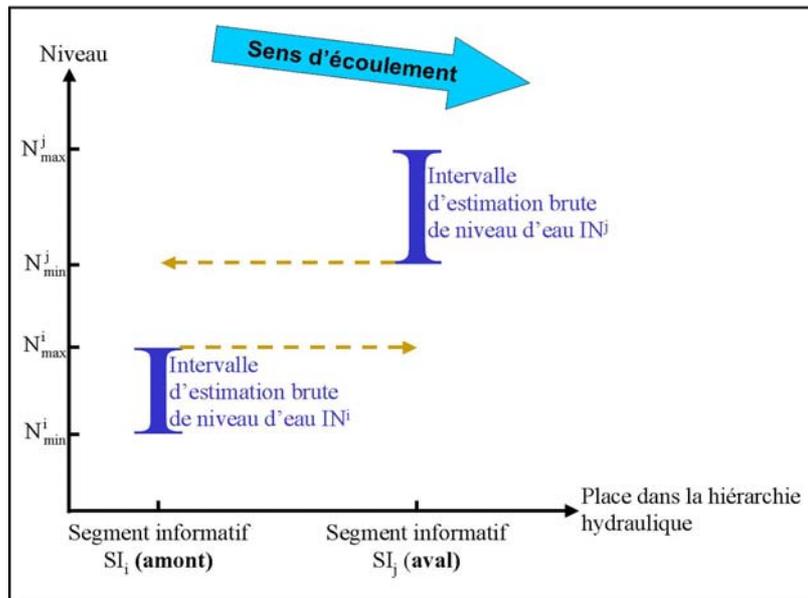


Figure 5.4 : Illustration de la notion de conflit hydraulique entre des estimations de niveau d'eau.

Les valeurs comprises au sein des deux intervalles d'estimation ne permettent pas de respecter le principe hydraulique de décroissance des niveaux en suivant le sens de l'écoulement.

En conséquence, l'algorithme de mise en cohérence est composé de deux phases successives (Raclot, 2003a) :

- une phase de vérification et le cas échéant d'élimination des conflits,
- une phase de resserrement des estimations et d'extraction de l'information cohérente.

5.3.3 La résolution des conflits

Lors de la phase d'élimination des conflits, l'ensemble des majorants et des minorants des intervalles d'estimations des niveaux d'eau affectées d'une relation d'ordre amont - aval sont comparés successivement. Si un conflit est rencontré, il est supposé que les estimations primaires de niveaux d'eau correspondantes sont erronées : les valeurs du majorant et du minorant correspondantes sont

« relâchées », i.e. remplacées respectivement par les bornes maximale et minimale de l'ensemble des valeurs possibles de niveaux d'eau dans la plaine (Figure 5.5).

NB : la phase d'élimination des conflits ne doit être nécessaire que de façon exceptionnelle de sorte que l'hypothèse (H1) précédemment définie reste valable.

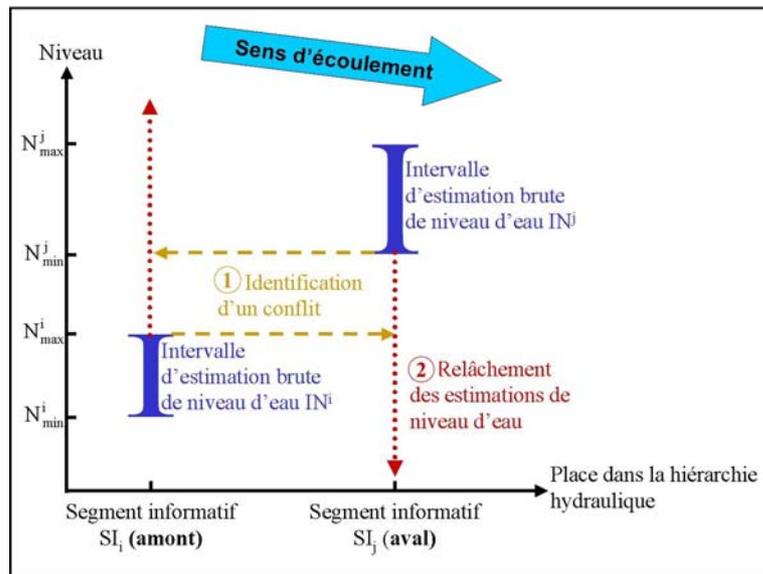


Figure 5.5 : Identification et résolution d'un conflit hydraulique

1 : Identification d'un conflit entre deux estimations des niveaux d'eau par comparaison du majorant amont et du minorant aval.

2 : Résolution du conflit par relâchement des estimations brutes de niveaux d'eau.

5.3.4 Le resserrement des estimations de niveau d'eau

Le resserrement des estimations de niveaux d'eau est la phase fondamentale de la mise en cohérence hydraulique. Il vise à résoudre le système de contrainte défini par (C1) et (C2).

Il est basé sur un algorithme développé par (Raclot, 2003a). Ce dernier a montré qu'il est possible d'éviter des itérations successives et avoir une résolution du système de contrainte rapide, (Raclot, 2003a) en ordonnant les calculs, c'est à dire en orientant la propagation des contraintes. Cela signifie que l'algorithme impose une décroissance des majorants de l'amont vers l'aval et une croissance des minorants de l'aval vers l'amont (Figure 5.6, p.105). Pour cela, l'algorithme parcourt les estimations de niveaux d'eau d'une part depuis l'amont vers l'aval de sorte à imposer une décroissance des majorants (N_{max}^i) et d'autre part, depuis l'aval vers l'amont de sorte à imposer une croissance des minorants (N_{min}^i).

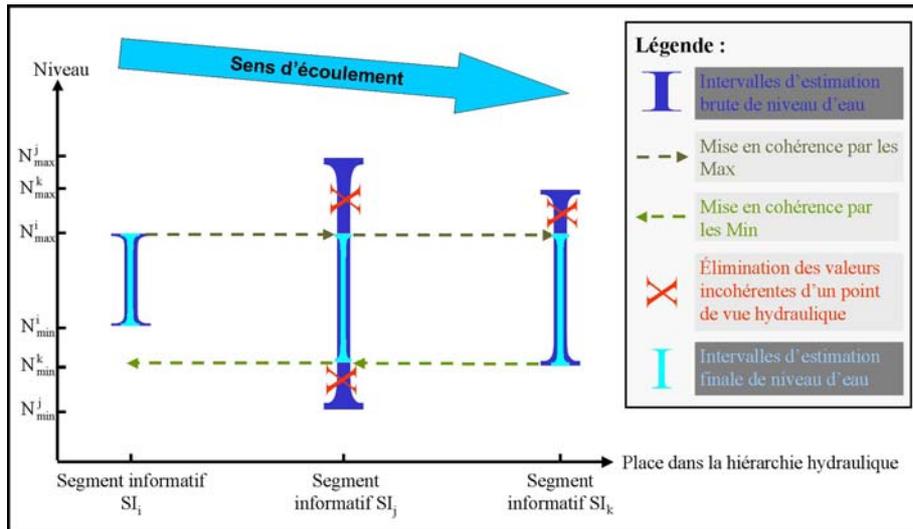


Figure 5.6 : Principe de la mise en cohérence hydraulique des estimations des niveaux d'eau : extraction de l'information commune cohérente.

Lorsqu'une hypothèse d'écoulement monodimensionnel est recevable, l'ordre des calculs est assez simple à déterminer puisque la hiérarchie hydraulique est linéaire, c'est à dire qu'elle est organisée sous la forme d'une liste de segments informatifs reliés les uns aux autres par des relations d'ordre amont-aval (Cf. Figure 5.2C, p.98). Un double parcours amont-aval et aval-amont est suffisant pour résoudre le système de contrainte.

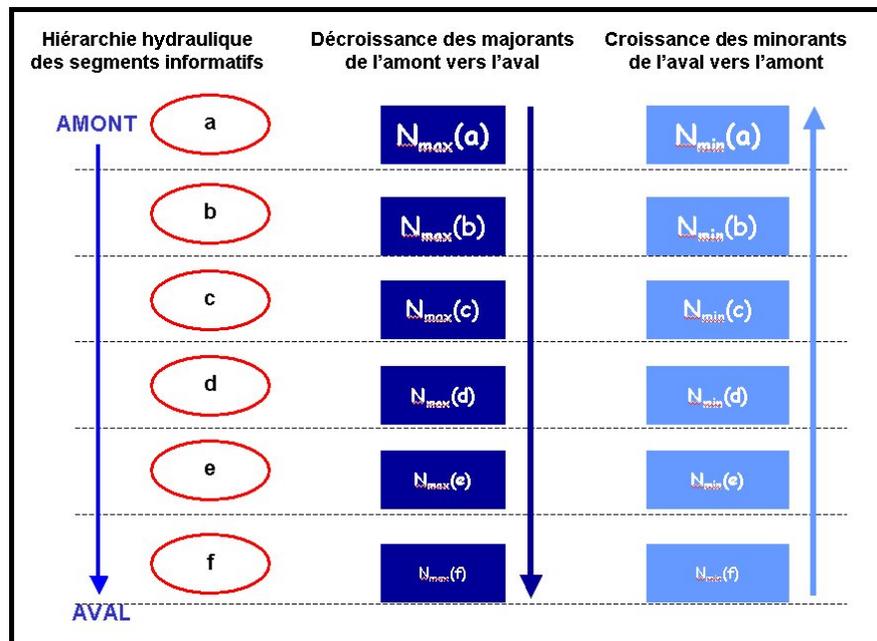


Figure 5.7 : Propagation des contraintes de cohérence hydraulique ordonnée suivant la logique d'écoulement de la hiérarchie hydraulique avec un schéma monodimensionnel.

Par contre dans le cas d'un écoulement bidimensionnel, la hiérarchie hydraulique peut être arborescente, voire maillée (Cf. Figure 5.3F, p.101). Dans ce cas, une solution simple est de définir

des « chemins hydrauliques préférentiels » composés de suites de lignes d'écoulement préférentielles (Cf. § 5.2.2.2) interconnectées¹¹, ordonnées suivant le sens de l'écoulement. Chaque segment informatif étant repéré le long de la ligne hydraulique préférentielle à laquelle il est associé, il est alors possible de déduire d'un chemin hydraulique préférentiel une suite de segments informatifs reliés linéairement de l'amont à l'aval par des relations d'ordre, comme dans le cas d'une hiérarchie hydraulique monodimensionnelle. La propagation des contraintes est alors effectuée en suivant, l'un après l'autre, chaque chemin hydraulique préférentiel dans le sens amont-aval pour imposer la décroissance des majorants et dans le sens aval-amont pour la croissance des minorants. Cela permet de ramener la propagation des contraintes avec une hiérarchie hydraulique bidimensionnelle à une suite de propagation de contrainte avec une hiérarchie hydraulique monodimensionnelle.

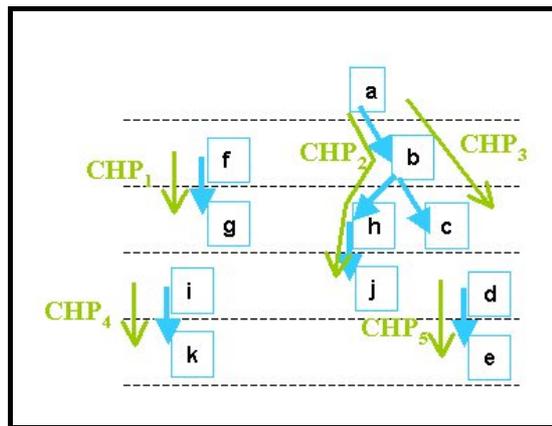


Figure 5.8 : Hiérarchie hydraulique des segments informatifs et Chemins Hydrauliques Préférentiels (CHP).

L'application de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique conduit à de nouvelles estimations des niveaux d'eau - suivant les intervalles $IN2^i = [N2_{min}^i; N2_{max}^i]$ - rendues cohérentes hydrauliquement. On en déduit la valeur moyenne $N2_{moy}^i$ des estimations calculées - $Moyenne(N2_{min}^i, N2_{max}^i)$ - pour chaque segment informatif.

Automatisation de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique

L'algorithme de mise en cohérence peut être automatisé et l'a été au cours de la thèse sous forme programme en langage C, développé sous DEV C++[©].

¹¹ Deux lignes d'écoulement sont considérées connectées si les unités hydrauliques auxquelles elles sont associées le sont.

Les données d'entrée de cet algorithme sont deux fichiers texte :

- Un fichier des pixels (1 ligne par pixel) des segments informatifs non découpés pour lesquels sont renseignés : l'identifiant du pixel, son altitude, l'identifiant du segment informatif auquel il appartient et l'identifiant de la ligne d'écoulement préférentielle auquel il est rattaché, et son abscisse curviligne le long de cette ligne d'écoulement préférentielle.
- Un fichier des « chemins hydrauliques préférentiels » : chaque ligne du fichier contient une liste de lignes d'écoulement préférentielles interconnectées, ordonnées suivant le sens de l'écoulement, définissant un « chemin hydraulique préférentiel ».

Remarque : dans le cas d'une hiérarchie hydraulique monodimensionnelle, le fichier des chemins hydraulique ne contient qu'une ligne puisque la hiérarchie hydraulique est linéaire.

L'organigramme du programme développé est présenté dans la Figure 5.9.

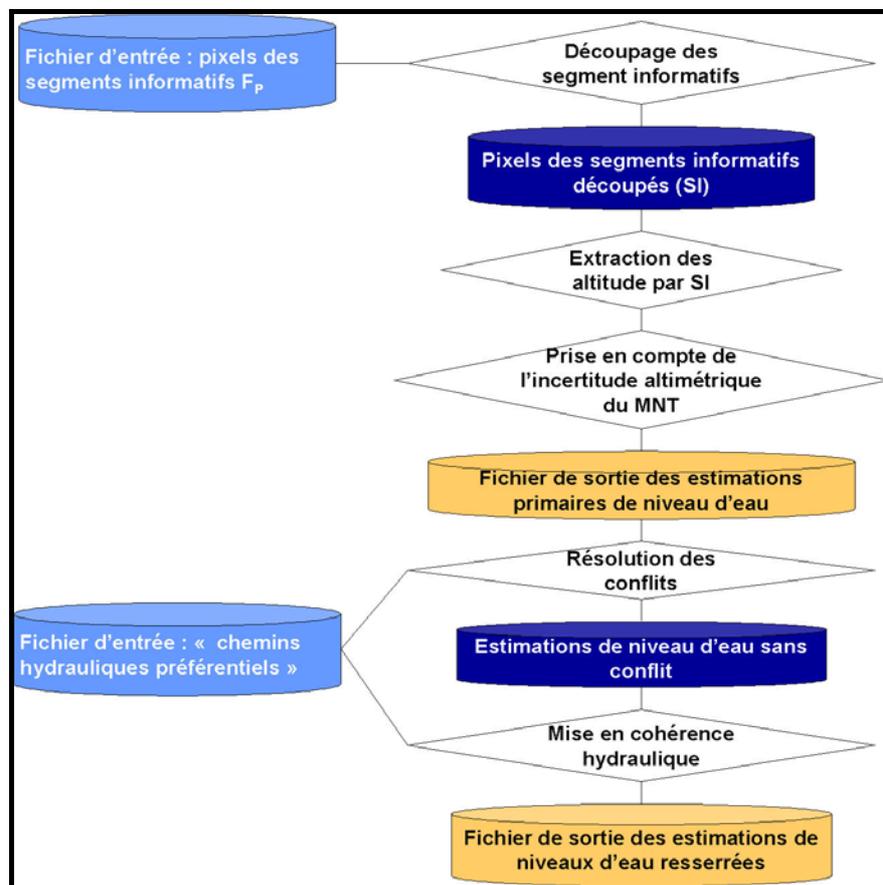


Figure 5.9 : Organigramme du programme de mise en cohérence hydraulique des estimations primaires de niveau d'eau.

NB : Lors de la résolution des conflits et de la mise en cohérence hydraulique les fichiers des estimations primaires et des estimations sans conflits **sont parcourus en suivant la logique de l'écoulement** définie par les chemins hydrauliques préférentiels et la hiérarchie hydraulique des segments informatifs.

En sortie de ce programme deux fichiers sont obtenus :

- un fichier des pixels des segments informatifs découpés,
- un fichier des estimations primaires et finales de niveau d'eau.

5.4 Conclusion

Le Chapitre 5 a proposé une méthode de quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau en plaine inondée grâce aux bordures d'inondation extraite d'une image satellitaire radar. Cette méthode est constituée de trois phases principales :

- croisement des segments informatifs avec un MNT fin qui permet d'obtenir des estimations primaires de niveaux d'eau,
- définition d'un schéma de circulation des eaux dont découle une hiérarchie hydraulique des segments informatifs,
- application des contraintes spatiales imposées par le schéma de circulation des eaux pour mettre en cohérence hydraulique et réduire les intervalles d'estimation primaire des niveaux d'eau.

Pour résumer ce chapitre, la synthétise les différentes techniques mises en œuvre et les principaux résultats obtenus.

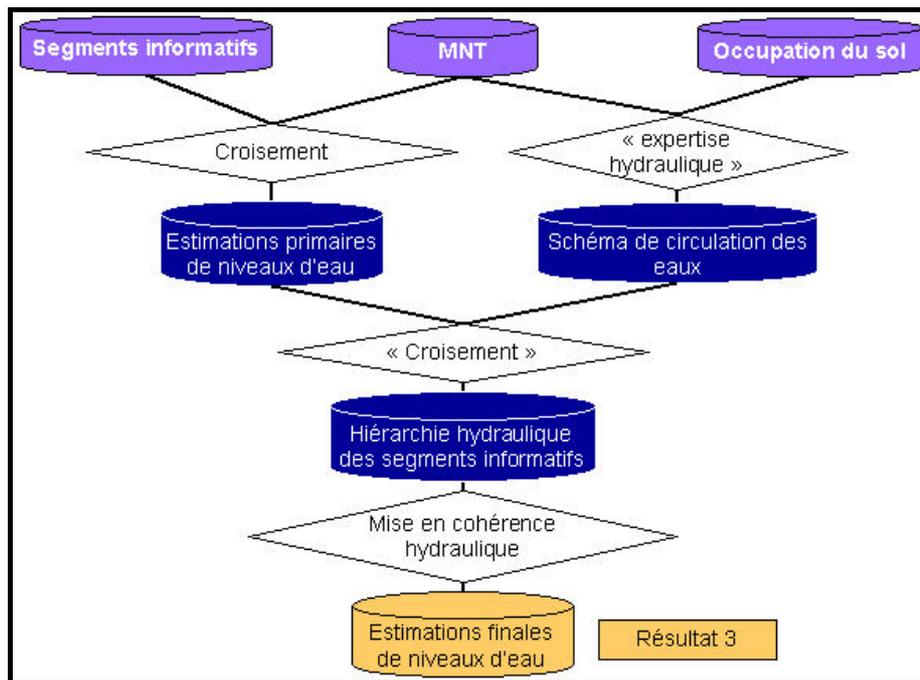


Figure 5.10 : Schéma de principe de la méthode de quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau.

Le concept de mise en cohérence hydraulique a été emprunté aux travaux sur des photographies aériennes de (Raclot, 2003a) et adapté pour des images satellitaires radar.

La partie algorithmique de la mise en cohérence hydraulique (§ 5.3) a pu être adaptée facilement aux estimations de niveaux d'eau issues d'une image satellitaire.

Par contre la difficulté principale, pour le transfert de l'approche photo (Raclot, 2003a) aux images satellitaires, a été la détermination du schéma de circulation des eaux dans la plaine d'inondation. En effet, dans les travaux de (Raclot, 2003a), le schéma de circulation des eaux a pu être « observé » directement sur des photographies aériennes, ce qui n'est pas le cas pour des images satellitaires radar.

Pour pallier ce manque d'information, il a été nécessaire de faire appel à des hypothèses fortes sur le schéma de circulation des eaux (écoulement monodimensionnel) lorsque celles-ci sont acceptables ou à une phase d'expertise qui s'appuie sur l'interprétation de la carte d'inondation, de données topographiques, et de données d'occupation du sol. Cette phase d'expertise implique une interprétation visuelle et nécessite un opérateur, ce qui limite les perspectives d'automatisation, et en fait le point le plus délicat et le plus lourd à mettre en œuvre dans la méthode.

La méthodologie présentée dans ce chapitre permet d'estimer des niveaux d'eau, sous forme d'intervalles, en de nombreux points de la plaine. Celles-ci seront exploitées au Chapitre 6 pour améliorer le calage d'un modèle hydraulique. Il est important de noter que le calage d'un modèle hydraulique n'est pas la seule perspective d'exploitation des estimations de niveaux d'eau extraites d'une image satellitaire de crue. En effet, il semble tout à fait possible de les utiliser dans le cadre de l'assimilation dans les modèles. En particulier, elles pourraient être utilisées comme condition initiale d'un modèle hydraulique de prévision. Elles permettraient le développement d'une chaîne de traitement opérationnelle qui à partir d'une image satellitaire de crue pourrait extraire des niveaux d'eau et les utiliser comme condition initiale d'un modèle hydraulique. Cette chaîne nécessiterait d'automatiser le décodage d'une image satellitaire de crue. Dans l'état actuel, l'automatisation de la méthode d'estimation des niveaux d'eau ne semble possible que si une hypothèse d'écoulement monodimensionnelle est recevable. En effet, grâce à cette hypothèse, le schéma de circulation des eaux peut être connu à priori et l'estimation de niveau d'eau peut être entièrement automatisée ce qui rend un chaîne de traitement automatisée possible.

Chapitre 6.

Intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique.

Sommaire

6.1	Introduction	111
6.2	Modèle hydraulique, calage et donnée image	112
6.3	Simulations Monte-Carlo et méthode GLUE	113
6.4	Évaluation des simulations Monte-Carlo	114
6.4.1	Calage préalable grâce aux hydrogrammes mesurés	115
6.4.2	Intégration d'une carte des étendues inondées dans la procédure de calage.	115
6.4.3	Intégration des estimations de niveau d'eau satellitaires dans la procédure de calage.	119
6.5	Conclusion	121

Un objectif de la thèse est d'intégrer les caractéristiques spatiales extraites d'une image satellitaire dans la modélisation hydraulique. Pour cela, plusieurs solutions sont envisageables, par exemple l'assimilation dans les modèles ou l'aide au calage.

Dans ce chapitre nous nous intéresserons plus particulièrement au calage et à son amélioration grâce à une carte d'inondation ou des niveaux d'eau extraits d'une image satellitaire de crue. L'objectif est de permettre le développement de modèles mieux contraints, et par conséquent plus fiables en prévision et prévention.

6.1 Introduction

Le calage d'un modèle hydraulique suppose de contraindre celui-ci avec des connaissances concernant la crue - e.g. : niveaux d'eau, débits, surfaces inondées etc. - (Vidal, 2005). Parmi les méthodes de calage des modèles, il est possible de citer les techniques basées sur l'optimisation des valeurs des paramètres.

L'optimisation repose sur la recherche d'un jeu de valeurs des paramètres qui rend maximal des critères de performance du modèle. Cependant, comme l'annonce (Beven, 2006) :

« the apparent global optimal may change significantly with changes in calibration data, errors in input data or performance measure¹² ».

¹² L'optimum global apparent peut changer de façon significative selon les données de calage, les erreurs sur les données d'entrée ou les mesures de performances.

En conséquence, selon les données de calage utilisées et les critères de performance choisis, le jeu de paramètre « optimal » est susceptible de changer de façon importante. Ce phénomène, appelé équi-finalité (Beven & Binley, 1992) est d'autant plus marqué que les données de calage sont en quantité réduite (Aronica et al., 1998). Cette remarque est confirmée par les travaux de (Horritt & Bates, 2002) qui ont constaté, pour une zone d'étude, une crue et un modèle hydraulique donnés, des optima diamétralement opposés dans l'espace des paramètres selon que le calage est effectué sur la capacité du modèle à reproduire le temps de transfert du débit ou les surfaces inondées dans la plaine. Ces constatations montrent l'importance de l'équi-finalité et la nécessité d'intégrer des données nouvelles telles que les images satellitaires dans le calage des modèles hydrauliques.

6.2 Modèle hydraulique, calage et donnée image

Un des objectifs visés est l'aide à la gestion des inondations en contexte de crise et en particulier l'aide à la prévision des inondations, avec en perspective le développement d'une chaîne de traitement opérationnel pour la prévision. En conséquence, les modèles employés doivent avoir des temps de calcul faibles.

Parmi les modèles hydrauliques peu gourmands en temps de calcul qui permettent néanmoins d'obtenir des résultats satisfaisants, il est possible de citer les modèles filaires et les modèles 1D-casiers (Cf. §1.2.2). Les modèles filaires ont pour inconvénient de ne pas prendre en compte les phénomènes de stockage locaux au cours d'une inondation. En conséquence, dans cette partie de la démarche, nous avons choisi de nous intéresser à un modèle hydraulique 1D-casier.

La mise en place d'un modèle hydraulique nécessite en particulier la définition d'une géométrie, de conditions initiales, de conditions aux limites et de paramètres hydrauliques dont en particulier les coefficients de frottement (Cf. §1.2.2). Pour un modèle hydraulique 1D-casier, la géométrie est définie par une ligne principale d'écoulement (le plus souvent l'axe médian du lit mineur de la rivière (Roux, 2004), des profils en travers et des casiers hydrauliques. Une des hypothèses de ce type de modèle est que le niveau d'eau est supposé uniforme au sein des casiers et des profils en travers.

Dans la procédure de calage, nous supposons connues les conditions initiales et les conditions aux limites. Les paramètres que nous allons chercher à caler sont les coefficients de frottement (coefficient de Manning) sur les profils en travers du modèle et les coefficients intervenant dans les lois d'ouvrages hydrauliques (e.g. : vannes des barrages, ponts, seuils...).

Traditionnellement, le calage d'un modèle hydraulique est réalisé à partir d'hydrogrammes mesurés. Cependant, à cause du phénomène d'équi-finalité, ces données ne permettent pas nécessairement de contraindre un modèle de façon suffisante pour qu'il soit fiable en prévision (Aronica et al., 1998). C'est pourquoi nous proposons d'intégrer, en plus d'hydrogrammes mesurés, des caractéristiques hydrauliques extraites d'une image satellitaire dans la procédure de calage. Pour cela, un premier calage sera réalisé grâce des hydrogrammes mesurés. Afin d'améliorer ce calage et de réduire le phénomène d'équi-finalité, il sera poursuivi grâce à l'intégration d'une carte d'inondation certaine (Cf. Chapitre 4) ou d'une distribution spatiale des niveaux d'eau (Cf. Chapitre 5) extraits d'une image satellitaire radar de crue.

Pour évaluer l'apport de l'intégration des caractéristiques hydrauliques extraites d'une image satellitaire pour la réduction de l'équifinalité et cerner les incertitudes du calage, la méthode de calage employée est inspirée de la méthode GLUE (Beven & Binley, 1992).

6.3 Simulations Monte-Carlo et méthode GLUE

La méthode GLUE a été développée par (Beven & Binley, 1992) d'après la méthode d'analyse de sensibilité de Hornberger-Spear-Young (HSY) (Hornberger & Spear, 1981; Whitehead & Young, 1979; Young, 1983). D'après (Beven, 2001), l'objectif de la méthode GLUE peut être défini de la façon suivante :

« The aim of the GLUE methodology is to produce a set of behavioural models that properly reflect the uncertainties arising from the modelling process and that reproduce the observed behaviour of the catchment within the limitations of measurement error¹³ ».

En effet, dans cette méthode l'objectif n'est pas de fournir un modèle « optimal » (incompatible avec la thèse de l'équifinalité), mais un ensemble de modèles acceptables vis à vis d'observations. Un modèle est considéré acceptable s'il est capable de reproduire des observations à leurs incertitudes de mesure ou d'estimation près.

La méthode GLUE fournit ainsi un moyen d'estimer les incertitudes d'un modèle environnemental (Beven, 2006). Elle est basée sur des simulations Monte-carlo. Ces dernières exploitent un modèle mathématique afin de représenter, de façon discrète, les relations entre l'espace des paramètres d'entrée et l'espace des solutions de ce modèle (Horritt, 2002).

En d'autres termes, d'après (Vidal, 2005) :

« Elles consistent à analyser de manière statistique les résultats de simulations correspondant à un échantillon – extrait de manière aléatoire ou systématique – de l'espace des paramètres ».

L'espace des paramètres d'entrée désigne l'ensemble des valeurs possibles des paramètres du modèle. Il doit être défini au préalable sous forme d'intervalles de valeurs physiquement acceptables. Lorsque des paramètres sont connus a priori, il n'est pas nécessaire de les intégrer dans la procédure de calage, ce qui revient à leur associer une unique valeur acceptable.

La technique des simulations de Monte-Carlo a deux composantes :

- un générateur de réalisations dans l'espace des paramètres d'entrée (une réalisation = une valeur unique pour chaque paramètre d'entrée du modèle), aussi appelé de façon plus simple générateur de paramètre,
- un modèle qui calcule une solution pour chaque réalisation générée.

Introduit au sein du modèle, chaque réalisation sert à définir un « état » du modèle qui permet de calculer un résultat de simulation.

¹³ L'objectif de la méthode GLUE est de fournir un jeu de modèles comportementaux qui reflètent correctement les incertitudes résultant du processus de modélisation et qui reproduisent le comportement observé du bassin versant aux incertitudes de mesure près.

Dans la thèse, le générateur proposé tire aléatoirement des valeurs dans l'espace des paramètres sans hypothèse forte sur les distributions statistiques au sein des intervalles de valeurs possibles (distribution uniforme).

Dans la méthode GLUE, les résultats obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo sont évalués à l'aide de données de calage, ce qui nécessite la définition de critères de comparaison des résultats du modèle avec des données observées (Aronica et al., 2002). Ces critères de comparaison sont aussi appelés critères de performance, fonctions « coût » ou fonctions « objectif ».

Les critères de performance étant définis, des seuils d'acceptabilité sont imposés pour discriminer les paramètres donnant des résultats de simulation acceptables vis à vis des observations et au regard des objectifs visés. Le choix des seuils est le point de la méthode GLUE la plus contestée (Beven, 2006) car il laisse potentiellement un champ libre important à la subjectivité de l'opérateur.

Par ailleurs, un élément important de la méthode GLUE concerne le calcul des incertitudes sur les résultats du modèle calé. Chaque jeu de paramètre qui permet au modèle de remplir le ou les critère(s) d'acceptabilité est pondéré selon la performance du modèle correspondante. Cela permet d'associer une probabilité à un jeu de paramètres donné suivant la mesure de performance obtenue grâce à ce jeu de paramètres pendant le calage. Les performances des modèles acceptables sont ensuite utilisées pour calculer des intervalles de confiance pour chaque donnée de sortie du modèle (e.g. : hauteurs d'eau, étendues inondées...).

Dans ce chapitre, nous avons choisi de nous arrêter à la détermination des jeux de paramètres acceptables, sans aller jusqu'au calcul des intervalles de confiance pour les données de sortie du modèle. En effet, l'objectif dans ce chapitre est de montrer l'apport d'une image satellitaire pour une meilleure contrainte des modèles hydrauliques, qui se traduit par une réduction du nombre de jeux de paramètres acceptables.

6.4 Évaluation des simulations Monte-Carlo

Nous proposons dans cette section une méthodologie permettant d'intégrer successivement, dans une procédure de calage 1) des hydrogrammes observés, puis 2) des caractéristiques spatiales estimés à partir d'images satellitaires de crue : soit des étendues inondées, soit des niveaux d'eau. L'intégration des informations extraites d'images de crue, en complément des hydrogrammes mesurés, s'inscrit dans une volonté d'améliorer le calage des modèles hydrauliques (Horritt, 2000; Matgen et al., 2004; Pappenberger et al., 2005b). Elle vise à réduire le phénomène d'équifinalité dans le calage des modèles hydrauliques grâce à des contraintes plus fortes, permettant ainsi une valorisation des images satellitaires au-delà de la simple cartographie d'inondation.

L'évaluation des simulations Monte-carlo sera présentée en trois sections :

- calage préalable grâce aux hydrogrammes mesurés (approche « conventionnelle »),
- intégration des observations satellitaires d'étendues inondées dans la procédure de calage,
- intégration des estimations de niveau d'eau satellitaires dans la procédure de calage.

Dans ce paragraphe, les indices « obs » et « sim » désignent respectivement des valeurs observées et simulées.

6.4.1 Calage préalable grâce aux hydrogrammes mesurés

Dans le cas où des hydrogrammes observés sont disponibles au sein ou à l'aval de la zone d'étude, il est possible d'évaluer les résultats des simulations Monte-Carlo par leur capacité à reproduire, au cours du temps, l'évolution du débit.

Pour cela, nous proposons comme critère d'évaluation le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970), couramment utilisé en hydrologie (Vidal, 2005) :

$$\text{NASH} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{\text{sim}}(t) - Q_{\text{obs}}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{\text{obs}}(t) - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (6.1)$$

Où $Q_{\text{obs}}(t)$ et $Q_{\text{sim}}(t)$ sont respectivement les débits observés et simulés à l'instant t et $\overline{Q_{\text{obs}}}$ la moyenne des débits observés sur la durée de simulation.

Cette relation est basée sur une analogie statistique avec le coefficient de détermination. Le critère de Nash représente le pourcentage de la variance de la série temporelle observée expliqué par le modèle. Il prend des valeurs entre $-\infty$ et 1. Un critère de 1 signifie un ajustement parfait entre données simulées et observées. Un critère négatif indique que le modèle donne de moins bons résultats que l'utilisation de la moyenne de l'échantillon.

Remarque : Il est aussi possible d'adapter le critère de Nash à des hauteurs d'eau observées en continu pour estimer la qualité du modèle en terme de niveaux d'eau simulés.

6.4.2 Intégration d'une carte des étendues inondées dans la procédure de calage.

Connaissant l'étendue inondée grâce au traitement d'une image radar de crue (Cf. Chapitre 4), nous proposons de poursuivre le premier calage effectué à partir d'hydrogrammes observés, en analysant la correspondance, à l'instant t de l'image, entre le résultat du modèle et l'observation radar.

Comme il a été indiqué au Chapitre 4, une carte d'inondation extraite d'une image satellitaire radar peut être localement incertaine. C'est pourquoi, dans la procédure de calage, nous proposons de restreindre, grâce à la carte d'inondation certaine, l'information sur l'étendue inondée fournie par l'image radar aux zones où la présence ou l'absence d'eau est certaine (Figure 4.4C, p.89).

La comparaison entre la carte d'inondation certaine et le résultat d'un modèle hydraulique 1D-casier n'est pas immédiate pour deux raisons. D'une part, la carte d'inondation certaine fournit une étendue inondée en deux dimensions alors que le modèle fournit des résultats sur des profils en travers et des casiers hydrauliques. En conséquence, il est nécessaire de trouver un mode de représentation commun de la carte d'inondation certaine et des résultats du modèle. D'autre part, la plupart des modèles hydrauliques calcule des niveaux d'eau et pas directement des étendues inondées. Il est en conséquence nécessaire d'estimer ces étendues à partir des résultats de niveaux d'eau simulés par le modèle.

L'uniformisation des modes de représentation des résultats du modèle et de la carte d'inondation, ainsi que l'estimation des zones inondées simulées par le modèle font l'objet des deux paragraphes suivants.

Uniformisation des modes de représentation des résultats du modèle et de la carte d'inondation

Pour trouver un mode représentation commun entre la carte d'inondation satellitaire et les résultats du modèle, deux solutions sont possibles : 1) adopter la représentation du modèle, c'est à dire échantillonner la carte d'inondation de sorte à n'en conserver que la partie qui coïncide géographiquement avec les profils et casiers, ou 2) adopter la représentation de la carte d'inondation, ce qui implique d'interpoler les résultats entre les profils en travers et les casiers du modèle de sorte à représenter les résultats du modèles de façon continue dans le plan horizontal (X,Y).

Étant donné que l'interpolation implique d'ajouter une part d'information qui ne provient ni du modèle, ni de la carte d'inondation, nous avons choisi la première solution. Pour convertir la carte d'inondation, en une information sous la forme de profil en travers et de casier hydraulique, une solution simple est d'effectuer un croisement, sous SIG, de la carte d'inondation certaine avec les profil en travers et les casiers hydrauliques. Ce croisement correspond à l'extraction, à pas d'espace régulier (par exemple la taille du pixel de la carte d'inondation), des valeurs de la carte d'inondation certaine le long des profils en travers du modèle et au sein des casiers hydrauliques.

Dans le cas des profil en travers, nous obtenons une liste de nombres pouvant prendre la valeur : 0 (Terre), 1 (Eau), 2 (Limite Floue), ou 3 (Zone Incertaine) que nous nommerons par la suite « **emprise transversale observée de l'inondation** » (Figure 6.1).

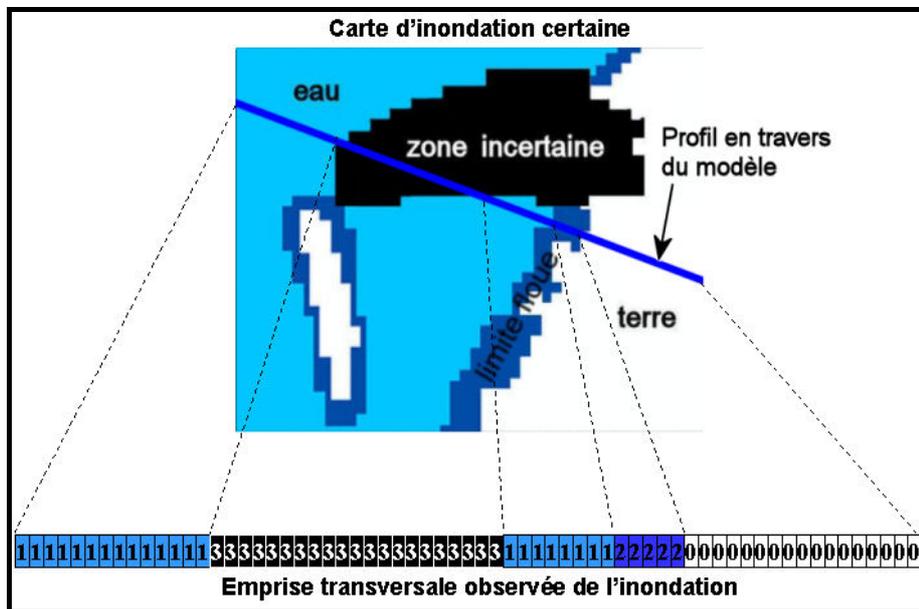


Figure 6.1 : Estimation de l'emprise transversale observée de l'inondation sur un profil en travers à partir de la carte d'inondation certaine

Dans le cas des profils en travers, nous obtenons un tableau dont chaque case représente un pixel de la carte d'inondation certaine au sein du casier hydraulique considéré et peut avoir comme valeur : 0 (Terre), 1 (Eau), 2 (Limite Floue), ou 3 (Zone Incertaine).

Estimation des zones inondées simulées par le modèle

Un modèle hydraulique ne fournit pas nécessairement directement d'informations sur les emprises de l'inondation. C'est pourquoi nous proposons de les estimer grâce aux niveaux d'eau obtenus à l'issue d'une simulation du modèle.

Pour cela il est nécessaire de connaître les altitudes du terrain dans la plaine d'inondation. Cette information est présente dans la géométrie du modèle hydraulique car celle-ci contient des profils en travers et des casiers hydrauliques en trois dimensions.

Par conséquent, il est possible de déduire les « **emprises transversales simulées de l'inondation** » par profil en travers par seuillage altimétrique (seuil égal à la valeur du niveau d'eau fourni par le modèle hydraulique) sur les altitudes du terrain. Il en résulte, pour chaque profil en travers, une liste de nombres pouvant prendre la valeur : 0 (Terre), ou 1 (Eau) (Cf. Figure 6.2).

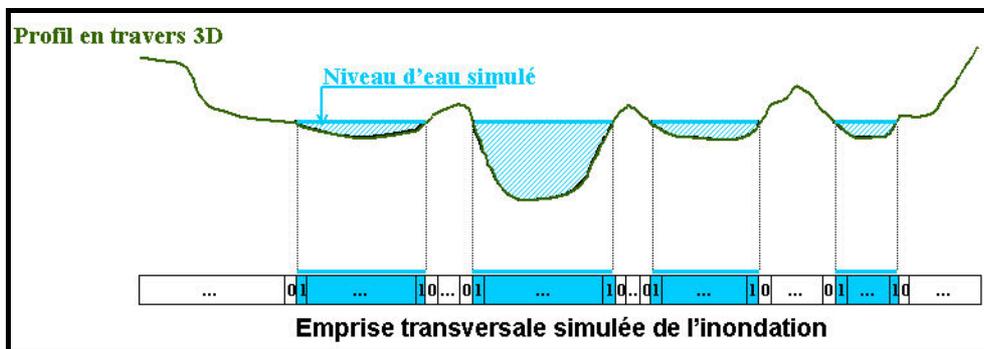


Figure 6.2 : Calcul de l'emprise transversale simulée de l'inondation sur un profil en travers à partir du niveau d'eau calculé par le modèle.

Le même calcul peut être appliquée afin de déterminer l'étendue inondée à partir du niveau d'eau simulé sur chaque casier. Dans ce cas, un tableau représentant l'étendue inondée à l'intérieur du casier est obtenu.

Critères d'évaluation du modèle vis à vis de l'étendue inondée observée

Les emprises transversales observées de l'inondation (à partir d'images satellitaires) ne sont a priori disponibles que sur une partie des sections en travers du modèle et pour une seule date (acquisition de l'image). La comparaison entre simulé et observé ne peut donc être effectuée que sur les profils et casiers pour lesquels une observation est disponible, à la date d'acquisition de l'image.

Pour évaluer la capacité du modèle hydraulique à reproduire les étendues inondées, nous proposons de construire une matrice de confusion basée sur la comparaison des emprises d'inondation simulées et observées, en dehors des zones incertaines et des limites floues de la carte d'inondation (Figure 4.4C, p.89). Il est en effet important de retirer de la comparaison les zones incertaines et les bordures floues pour autoriser le modèle hydraulique à inonder les zones d'arbres et de bâtiments, et permettre de considérer la bordure floue comme une frange d'incertitude au sein de laquelle on veut que le modèle place la limite d'inondation.

Les termes de la matrice de confusion que nous proposons d'utiliser pour le calcul des critères d'évaluation des simulations Monte-Carlo sont au nombre de 3 et correspondent aux :

- zones inondées communes (noté par la suite BON),
- zones inondées observées et non simulées (noté par la suite MOINS),
- zones inondées simulées non observées (noté par la suite PLUS).

Il paraît raisonnable de considérer que les emprises de l'inondation simulées et observées ne peuvent être identiques en raison de leurs défauts respectifs. Suivant les travaux de (Gineste, 1998), un « optimum » peut être obtenu lorsque PLUS et MOINS s'équilibrent : PLUS~MOINS. C'est pourquoi, nous avons choisi de privilégier les simulations qui équilibrent les erreurs (PLUS et MOINS) et qui fournissent un pourcentage raisonnable de zones communes entre simulé et observé (BON).

A partir des trois termes de la matrice de confusion, les critères d'évaluation des simulations Monte-Carlo proposés sont les suivants :

$$\text{Diff}_{\text{erreur}} = 1 - \frac{\sum(\text{PLUS}_i - \text{MOINS}_i)}{\text{Somme}_{\text{obs}}} \quad (6.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Perf}_{\text{étendue_inondée}} = \frac{\sum S_{\text{sat},i}}{N_{\text{sat_étendue}}}, \text{ avec :} \\ S_{\text{sat},i} = \begin{cases} 1 & \text{si } (\text{PLUS}_i = 0 \ \& \ \text{MOINS}_i = 0) \\ 0 & \text{sin on} \end{cases} \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Dans les relations (6.2) et (6.3), $I_{\text{sat_étendue}}$ est l'ensemble (de taille $N_{\text{sat_étendue}}$) des numéros de profils en travers et casier du modèle hydraulique sur lesquels des observations sont disponibles, $\text{Somme}_{\text{obs}}$ le nombre total de terme, dans les séries représentant les emprises transversales observées de l'inondation et les étendues inondées au sein des casiers, dont la valeur est *Eau* (Figure 6.1).

Le critère de d'évaluation $\text{Diff}_{\text{erreur}}$ - relation (6.2) - traduit la différence entre simulé « en trop » et « en moins » par rapport à l'observé. Il est égal à 1 s'il y a égalité des emprises de l'inondation simulées « en trop » et « en moins ».

Le critère d'évaluation $\text{Perf}_{\text{étendue_inondée}}$ - relation (6.3) - représente le pourcentage de profils en travers et casiers sur lesquels le modèle simule correctement les emprises d'inondation compte tenu des incertitudes sur les observations. Une emprise d'inondation simulée est correcte vis à vis de l'emprise observée si les limites de ces deux emprises coïncident. En d'autres termes, cela signifie que les limites d'inondations simulées sont incluses au sein des limites floues observées. En conséquence, le critère d'évaluation $\text{Perf}_{\text{étendue_inondée}}$ vaut 1 si la totalité des limites d'inondations simulées est incluse au sein des limites floues de la carte d'inondation certaine.

Dans la méthode, nous proposons de considérer un jeu de paramètres acceptable au regard des étendues inondées observées si :

$$\text{Perf}_{\text{étendue_inondée}} > \text{Seuil}(\text{Perf}_{\text{étendue_inondée}}) \text{ et } \text{Diff}_{\text{erreur}} > \text{seuil}(\text{Diff}_{\text{erreur}}).$$

La détermination des seuils d'acceptabilité n'est pas présentée dans la partie méthodologique car elle dépend du site d'étude et des données disponibles.

6.4.3 Intégration des estimations de niveau d'eau satellitaires dans la procédure de calage.

Connaissant des niveaux d'eau dans la plaine d'inondation grâce au traitement d'une image radar de crue (Cf. Chapitre 5), nous proposons de poursuivre le premier calage effectué à partir d'hydrogrammes observés, en analysant la correspondance, à l'instant t de l'image, entre le résultat du modèle et l'observation radar. L'objectif est en conséquence d'intégrer les estimations de niveaux d'eau issues d'une image satellitaire dans le calage d'un modèle hydraulique.

De la même façon que pour les étendues inondées, les niveaux d'eau observés doivent être exprimés par profil en travers et casier hydraulique.

Estimation des niveaux d'eau par profils en travers et casiers du modèle hydraulique

Les estimations de niveaux d'eau obtenues au Chapitre 5 sont « ponctuelles » (par segment informatif). En conséquence, ces estimations doivent être adaptées à la géométrie du modèle hydraulique utilisé. Nous proposons de ramener l'information de niveaux d'eau par segment informatif à une information par profil en travers (ou casier) du modèle.

Pour rappel, la méthode d'estimation des niveaux d'eau proposée au Chapitre 5 repose sur trois phases successives :

- Phase 1 : estimation primaire de niveaux d'eau par croisement entre les segments informatifs et un MNT à haute résolution spatiale,
- Phase 2 : construction d'une hiérarchie hydraulique
- Phase 3 : réduction des incertitudes d'évaluation de niveaux d'eau par mise en cohérence hydraulique.

A l'issue de la phase 1, nous avons obtenu une estimation primaire de niveau d'eau par segment informatif. Nous proposons dans ce paragraphe de ramener cette information à une estimation primaire par profil en travers du modèle. Pour cela, un pixel d'un segment informatif est associé au profil en travers dont il est le plus proche et le cas échéant à d'autres profils en travers si la distance qui les sépare est inférieure à une distance de capture préalablement définie. La distance de capture peut par exemple être fixée à la moitié de la distance moyenne entre deux profils en travers du modèle. L'ensemble des pixels des segments informatifs sont affectés d'une valeur d'altitude grâce à un croisement avec un MNT (Phase 1). En conséquence, l'ensemble des pixels des segments informatifs associés à un profil en travers permet de calculer un intervalle d'estimation du niveau d'eau sur le profil en travers considéré. A l'issue de cette étape, des profils en travers du modèle sont affectés d'une estimation propre (un intervalle par profil renseigné) de niveau d'eau. Ces estimations par profil en travers peuvent alors être mises en cohérence hydraulique à l'aide de l'algorithme présenté au paragraphe 5.3, les relations amont-aval entre profils en travers étant imposées par leurs positions respectives le long du profil en long de la rivière dans la géométrie modèle hydraulique.

NB : lorsque des segments informatifs sont situés au sein d'un casier hydraulique, l'intervalle retenu comme estimation du niveau d'eau est égal à l'union des intervalles d'estimation correspondant aux segments informatifs inclus dans ce casier.

Critères d'évaluation du modèle en terme de niveaux d'eau

Comme dans le cas des étendues inondées, les niveaux d'eau estimés à partir d'images satellitaires ne sont disponibles que sur une partie des profils en travers et casiers du modèle. La comparaison entre niveaux d'eau simulés et observés ne peut donc être effectuée que sur les profils et casiers pour lesquels une observation est disponible. D'autre part, les niveaux d'eau issus d'une image satellitaire caractérisent l'écoulement à un instant donné : la date d'acquisition de l'image. En conséquence, la comparaison doit être effectuée entre niveaux d'eau observés et simulés à la date d'acquisition de l'image satellitaire.

Pour estimer la qualité du modèle en terme d'estimation des niveaux d'eau dans la plaine, les critères d'évaluations suivants sont proposés :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Appartenance}_{\text{niveau}} = \frac{\sum_{i \in I_{\text{sat}}} X_{\text{sat},i}}{N_{\text{sat}}}, \text{ avec :} \\ X_{\text{sat},i} = \begin{cases} 1 & \text{si } NE_{\text{sim}}^i(t_{\text{sat}}) \in IN_{\text{sat}}^i \\ 0 & \text{si } NE_{\text{sim}}^i(t_{\text{sat}}) \notin IN_{\text{sat}}^i \end{cases} \end{array} \right. \quad (6.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Dist}_{\text{niveau}} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in I_{\text{sat_niveau}}} Z_{\text{sat_niveau},i}}{N_{\text{sat_niveau}}}}, \text{ avec :} \\ Z_{\text{sat},i} = \begin{cases} 1 & \text{si } NE_{\text{sim}}^i(t_{\text{sat}}) \in IN_{\text{sat}}^i \\ \text{MIN} \left\{ \left(NE_{\text{sim}}^i(t_{\text{sat}}) - NE_{\text{obs_min}}^i \right)^2; \left(NE_{\text{sim}}^i(t_{\text{sat}}) - NE_{\text{obs_max}}^i \right)^2 \right\} & \text{si } NE_{\text{sim}}^i(t_{\text{sat}}) \notin IN_{\text{sat}}^i \end{cases} \end{array} \right. \quad (6.5)$$

Dans les relations (6.4) et (6.5), $I_{\text{sat_niveau}}$ est l'ensemble (de taille $N_{\text{sat_niveau}}$) des numéros de profils en travers et casiers du modèle hydraulique sur lesquels des observations de niveaux (extraites de l'image satellitaire) sont disponibles, t_{sat} la date d'acquisition de l'image satellitaire, $NE_{\text{sim}}^i(t)$ le niveau d'eau simulé pour le profil en travers (ou casier) i à la date t , et $IN_{\text{sat}}^i = [NE_{\text{obs_min}}^i; NE_{\text{obs_max}}^i]$ l'intervalle d'estimation du niveau d'eau issu de l'image satellite sur le profil en travers (ou casier) i .

Le critère de performance $\text{Appartenance}_{\text{niveau}}$ - relation (6.4) - représente le pourcentage de profils et casiers sur lesquelles le modèle calcule une valeur de niveau d'eau incluse au sein des intervalles de niveaux observés. Cette fonction objectif repose sur l'hypothèse que le niveau d'eau réel au droit de chaque profil (ou casier) sur lequel une observation est disponible est inclus au sein de l'intervalle d'estimation correspondant (IN_{sat}^i). Ce critère montre l'adéquation globale des niveaux simulés avec les niveaux observés. Cependant, il incite à rejeter les modèles dont les niveaux simulés sont proches des intervalles d'estimation satellite sans y être inclus. C'est pourquoi, en complément de ce critère un second, $\text{Dist}_{\text{niveau}}$, qui traduit l'écart entre simulation et observation, est proposé.

Le critère $\text{Dist}_{\text{niveau}}$ - relation (6.5) - est inspiré d'une RMSE (Erreur Quadratique Moyenne, en anglais Root Mean Square Error) qui serait calculée entre la valeur du niveau d'eau simulé et l'intervalle d'estimation du niveau par satellite. En effet, $Z_{\text{sat},i}$ est le carré de l'écart minimal entre niveau d'eau simulé et valeurs incluses au sein des intervalles d'estimation satellitaires. Le critère $\text{Dist}_{\text{niveau}}$ vaut 1 si l'ensemble des valeurs simulées du niveau est inclus dans les intervalles d'estimation satellitaire.

Dans la méthode, nous proposons de considérer un jeu de paramètres acceptable au regard des niveaux d'eau observés si :

$Appartenance_{niveau} > Seuil(Appartenance_{niveau})$ et $Dist_{niveau} > seuil(Dist_{niveau})$.

La détermination des seuils d'acceptabilité n'est pas présentée dans la partie méthodologique car elle dépend du site d'étude et des données disponibles.

6.5 Conclusion

La méthodologie présentée exploite dans un premier des hydrogrammes mesurés pour un calage « traditionnel » d'un modèle hydraulique. Ensuite, afin de mieux contraindre le modèle hydraulique il est proposé d'intégrer des étendues inondées ou des niveaux d'eau « observés » à partir d'une image satellitaire radar. La méthode a pour double intérêt de valoriser les images satellitaires dans le cadre de la modélisation hydraulique des inondations et de permettre l'intégration de caractéristiques spatiales issues de la télédétection, distribuées dans l'espace, dans la procédure de calage d'un modèle hydraulique, en vue de la réduction de l'équifinalité. Elle présente par conséquent un apport certain à la fois pour la télédétection spatiale et la modélisation hydraulique.

L'intégration des étendues inondées a déjà fait l'objet de travaux, e.g. (Matgen et al., 2004). Par rapport aux travaux existants, l'intérêt principal de la méthode proposée est la suppression des parties incertaines d'une carte d'inondation satellitaire, qui permet de s'affranchir d'un certain nombre d'erreurs provenant de l'image radar et de son traitement.

Par ailleurs, la nouveauté dans l'approche proposée est avant tout l'intégration des niveaux d'eau « satellitaires » dans la procédure de calage, ces estimations étant particulièrement adaptées à la méthode GLUE puisqu'elles sont obtenues sous forme d'intervalles traduisant les incertitudes.

La méthodologie présentée permet d'intégrer des caractéristiques spatiales extraites d'images dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique. Elle ouvre des perspectives d'intégration de ces caractéristiques spatiales dans la modélisation hydraulique suivant d'autres modalités. En particulier, ces données pourraient être exploitées dans le cadre de l'assimilation de données dans les modèles hydrauliques. La méthodologie présentée a montré une voie d'intégration d'une image satellitaire de crue pour l'aide à la modélisation hydraulique. Cette méthode montre qu'il est possible de rendre les informations extraites d'images satellitaires de crue compatibles avec la géométrie d'un modèle hydraulique et par conséquent intégrables de façon aisée dans les modèles. En conséquence, l'assimilation des données images dans un modèle hydraulique paraît tout à fait envisageable.

De plus, dans le cas d'un modèle hydraulique monodimensionnel, il est possible d'automatiser la méthode d'estimation de niveaux d'eau et d'exprimer ceux-ci sous la forme d'estimation par profil en travers qui peuvent être assimilées dans un modèle 1D. Une chaîne de traitement opérationnelle de prévision qui assimile ces estimations de niveau d'eau dans un modèle est donc a priori réalisable. Le point le plus critique dans cette chaîne concernerait la disponibilité des images et la rapidité de leur traitement. En effet, pour pouvoir exploiter les images dans cette chaîne, il serait nécessaire d'avoir les données au bon moment, c'est à dire pendant les phases actives de la crue.

Partie III.

**Application de la méthode,
résultats et discussions**

Sommaire de la troisième partie

Introduction	125
Chapitre 7. Sites d'études et constitution de bases de données	127
Chapitre 8. Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.	143
Chapitre 9. Qualité des résultats de la méthode, discussions et perspectives	173

Introduction

La partie II a présentée des méthodologies d'exploitation d'une image satellitaire radar de crue permettant d'extraire une carte d'inondation au sein de laquelle l'information eau-non eau est certaine et une distribution spatiale des niveaux d'eau. De plus, elle a proposé une méthode d'intégration des données extraites d'une image satellitaire dans la modélisation hydraulique.

La troisième et dernière partie présente l'application des méthodologies sur des sites d'études réels et discute la qualité et l'intérêt des méthodes et des résultats obtenus.

Les sites d'études sont au nombre de quatre, dont un site principal, la Moselle et trois sites secondaires, l'Alzette, l'Hérault et la Meuse. Sur le site Moselle, l'ensemble des méthodologies proposées en partie II ont été appliquées. Le site d'étude de l'Alzette, pour lequel sont disponibles des mesures de plus hautes eaux, a permis de valider la méthode d'estimation des niveaux d'eau et d'évaluer les précisions des estimations obtenues. Les sites d'études complémentaires ont été exploités pour généraliser et discuter les méthodes d'exploitation des images satellitaires de crue.

Cette partie est structurée en trois chapitres. Le premier présente les sites d'étude et les données recueillies. Le second présente l'application des méthodes au site d'étude principal de la Moselle. Le troisième analyse la qualité des résultats qu'il est possible d'obtenir à l'issue des méthodologies grâce aux sites d'études complémentaires et dresse un bilan des avancées méthodologiques et techniques apportées, les replace au sein des objectifs initiaux et propose finalement des perspectives de la thèse.

Chapitre 7.

Sites d'études et constitution de bases de données

Sommaire

7.1	La Moselle entre Thionville et la frontière franco-germano-luxembourgeoise	127
7.1.1	La rivière Moselle et le site d'étude	127
7.1.2	Constitution d'une base de données	130
7.2	Les sites d'étude complémentaires	133
7.2.1	L'Alzette entre Steinsel et Mersch	133
7.2.2	La Meuse entre Dieue sur Meuse et Charleville-Mézières	137
7.2.3	L'Hérault entre Pézenas et Agde	139

Le site d'investigation principal de la thèse est la Moselle entre Thionville et la frontière franco-germano-luxembourgeoise sur lequel l'ensemble des méthodes présentées dans la partie II a été appliqué. Un deuxième site d'étude, l'Alzette (Grand-Duché du Luxembourg), a pu être exploité dans le cadre d'une collaboration avec le Centre de Recherche Publique pour valider la méthodologie d'estimation des niveaux d'eau. Par ailleurs, deux autres sites d'étude ont été exploités pour affiner, généraliser et discuter certaines méthodologies d'analyse des images satellitaires présentées aux chapitres 4 et 5.

Ce chapitre, décrit plus en détail le site d'étude principal (Moselle), les autres sites étant décrits de façon plus succincte.

7.1 La Moselle entre Thionville et la frontière franco-germano-luxembourgeoise

7.1.1 La rivière Moselle et le site d'étude

Le principal lieu d'investigation exploité au cours de la thèse est un linéaire de 25 km de cours d'eau, dans la plaine aval française de la Moselle, entre Uckange (France) et Perl (Allemagne), près de la frontière franco-germano-luxembourgeoise (Figure 7.1, p.128). Le bassin versant de la Moselle est particulièrement intéressant en raison de la diversité de son relief qui en fait un bassin largement représentatif des bassins européens (NOAH, 2000). De plus, les inondations qui s'y produisent sont représentatives des inondations de plaines (Puech et al., 2002).

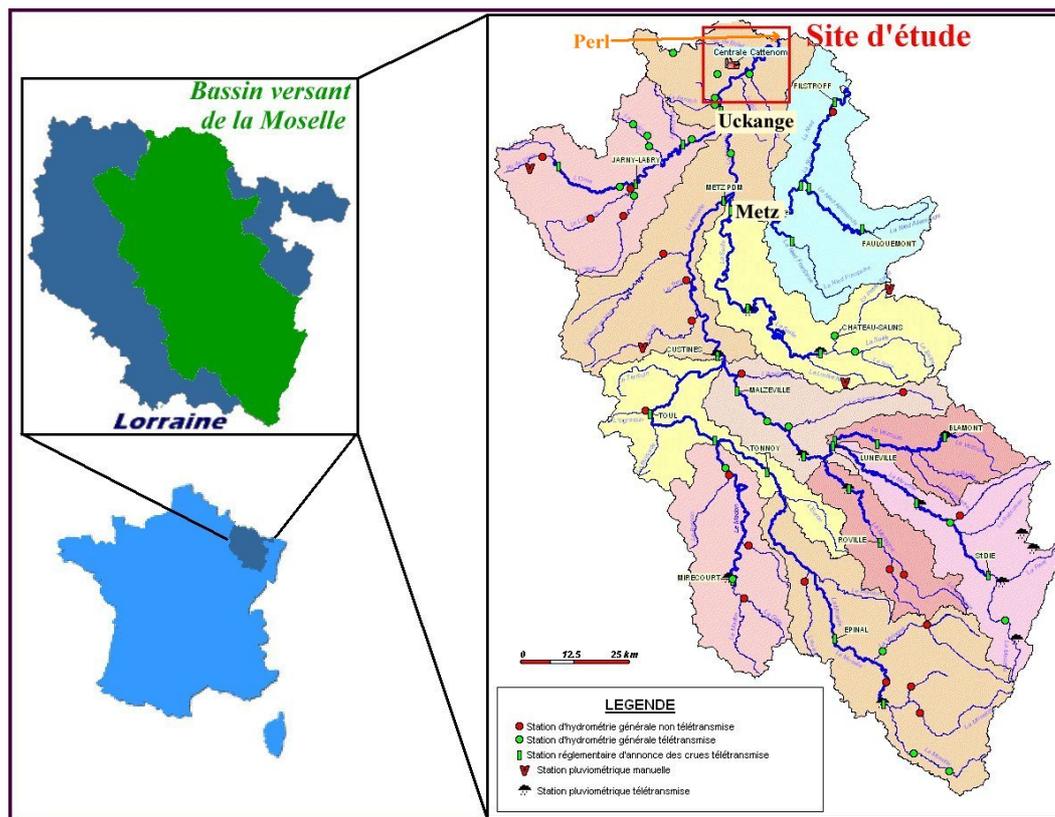


Figure 7.1 : Bassin versant de la partie française de la Moselle et site d'étude (inspiré de (DIREN Lorraine[®]))

7.1.1.1 Le bassin versant de la Moselle

Principal affluent du Rhin (à Coblenze), la Moselle prend sa source officielle sur le versant ouest des Vosges, près du col de Bussang, à 731 m d'altitude (Commissions Internationales pour la Protection de la Moselle et de la Sarre (CIPMS[®])). La superficie totale du bassin versant de la Moselle à la confluence avec le Rhin est de 28152 km². Les principaux affluents de la Moselle sur sa partie française sont la Meurthe (3085 km²), la Seille (1288 km²), et l'Orne (1268 km²) (DIREN Lorraine[®]). En raison du caractère de moyenne montagne du Massif vosgien et du relief en cuesta du Plateau lorrain, la partie française de la Moselle (linéaire de 305 km) a une pente supérieure à 1 % à proximité de sa source, qui décroît à 0,03 % à l'aval. Les pentes de ses affluents évoluent approximativement de la même manière (CIPMS[®]).

D'un point de vue géologique, le bassin versant de la Moselle peut être décomposé en deux parties :

- Le massif des Vosges est cristallin ou sédimentaire ancien (schistes primaires et permien) jusqu'aux alentours de Remiremont puis gréseux. Ces roches du socle ancien sont considérées comme peu perméables par les hydrogéologues.
- Le plateau lorrain à partir d'Épinal est constitué essentiellement de calcaires et de marnes. Il est également peu perméable et, du fait du relief mou qui réduit l'érosion, surmonté d'une épaisse couche altérée.

Le réseau hydrographique de la Moselle, en France, draine essentiellement le relief de cuesta du plateau lorrain, peu perméable, ce qui favorise l'écoulement en surface et implique des capacités

d'accumulation limitées dans la nappe phréatique et, comparativement, un régime plus faible de basses-eaux que pour les fleuves voisins, la Seine et la Meuse (CIPMS[®]).

Par ailleurs, le climat lorrain est océanique à influence continentale (Conseil Régional de Lorraine[®]). Les précipitations annuelles varient de 700 à 800 mm sur le plateau lorrain avec une distribution mensuelle peu contrastée (Figure 7.2) et de 1000 à 2500 mm sur les proches sommets.

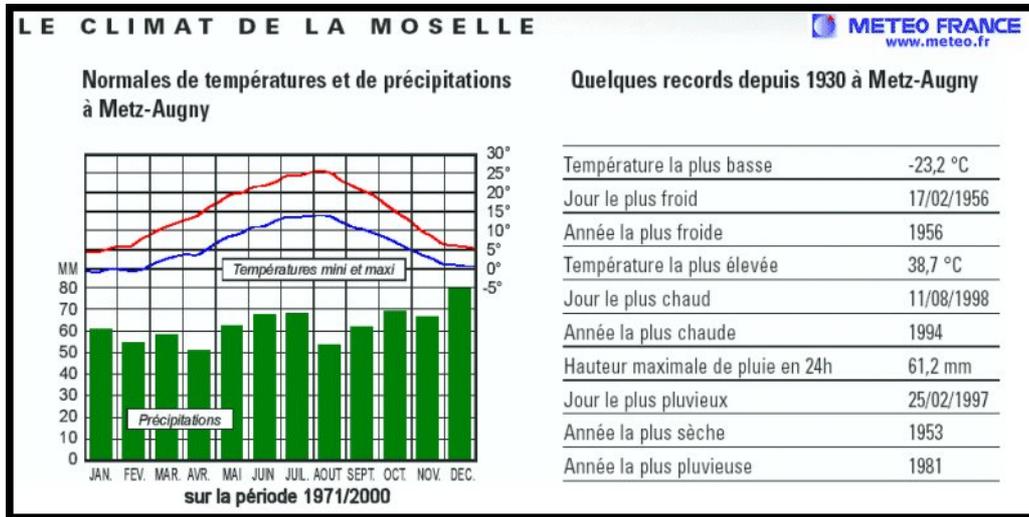


Figure 7.2 : Quelques caractéristiques climatiques de la Moselle à Metz (plateau lorrain) (Météo France[®]).

7.1.1.2 Caractéristiques hydrologiques/hydrauliques du site d'étude

A la frontière française, la Moselle a un bassin versant d'environ 11 500 km² (Agence de l'eau Rhin-Meuse[®]). La plaine d'inondation entre Thionville et Berg sur Moselle a une largeur moyenne de 5km. Dans cette plaine, la rivière a un parcours méandrique avec un niveau d'aménagement important. Une caractéristique de cette plaine est qu'elle se termine par des gorges (entre Berg sur Moselle et Perl). Ces gorges sont une caractéristique qu'il est important de garder à l'esprit lors de l'étude d'une crue car elle conditionnent en partie les écoulements. En effet, en période de crue, les gorges agissent comme un goulot d'étranglement qui freine l'écoulement (Figure 7.3). La plaine agit alors comme une zone de rétention naturelle de grande surface.

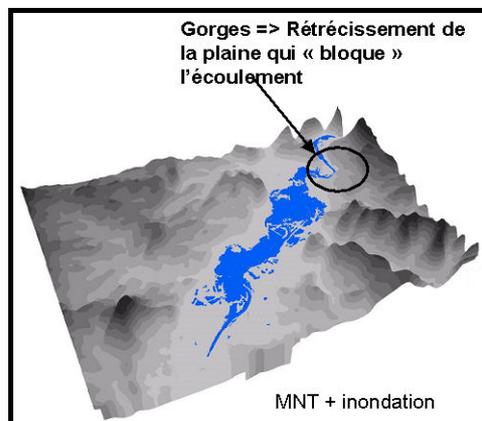


Figure 7.3 : Gorges en aval de la commune de Berg/Moselle

Au sein de la zone d'étude, la rivière est équipée de cinq ponts et de deux groupes barrage-écluse. Il est entendu ici par groupe barrage-écluse un dédoublement du lit mineur de la rivière en deux tronçons en parallèle, l'un étant équipé d'un barrage, l'autre d'une écluse. Le premier groupe barrage-écluse est situé au sein de la plaine alluviale à proximité de Koënímack (∼10km à l'aval d'Uckange), le second près de la limite aval de la zone d'étude (à Apach). Les consignes de manœuvre des deux barrages de la zone d'étude sont décrites en Annexe 2. En résumé, en période de montée des eaux (débit > 150 m³.s⁻¹), les vannes des barrages sont ouvertes progressivement, manuellement, de façon à maintenir une cote de l'eau en lit mineur à l'amont du barrage sensiblement constante. En période de crue, la navigation est interdite sur le cours d'eau, les écluses sont maintenues closes et les vannes des barrages sont totalement ouvertes. La position de ces ouvrages hydrauliques est illustrée dans la Figure 7.5. Les plans détaillés de ces barrages sont présentés en Annexe 2.

7.1.2 Constitution d'une base de données

Les données hydrométriques pour la crue de février 1997

Il est particulièrement important dans l'analyse d'une crue à partir d'images de télédétection de bien replacer la date d'acquisition des images dans le contexte hydrologique de la crue. En effet, les phénomènes et les schémas d'écoulement observés par le satellite sont très différents selon la relation d'antériorité entre la date d'acquisition de l'image et la date de passage du pic de crue - image acquise avant, pendant ou après le passage du pic de crue.

Le mois de février 1997 a été particulièrement pluvieux dans le bassin de la Moselle (cumuls supérieurs à 100mm, cf. Figure A 1.1 en Annexe 1). En particulier, le 25 février, la plus grande partie du bassin versant a été soumise à des pluies de fortes intensités (Cf. exemple de Metz, Figure 7.2, p.129). Au sein de la zone d'étude les données hydrométriques suivantes ont pu être recueillies :

- des mesures de hauteurs d'eau et des estimations de débits (courbes de tarage) à Uckange (Amont) et Perl (aval) (Figure 7.5),
- des mesures de débits (débitmètre à ultrason) à proximité de la prise d'eau de la centrale EDF de Cattenom (Figure 7.5).

Les données de débits d'Uckange et Perl sont disponibles pour toute la durée de la crue (pas de temps 1h), alors que les données de la prise d'eau de la centrale (EDF) ne sont disponibles que pour les débits inférieurs à 500 m³.s⁻¹. La Figure 7.4 présente les hydrogrammes qui ont été collectées aux stations hydrométriques d'Uckange (données DIREN Lorraine) et Perl (données des services hydrométriques allemand : Wasser und Schifffahrt-Direktion SüdWest) et à proximité de la prise d'eau de la centrale EDF de Cattenom (données EDF).

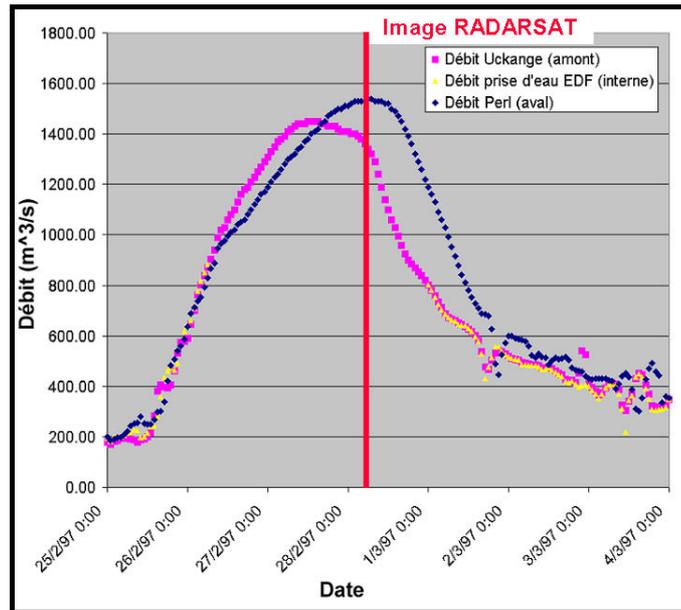


Figure 7.4 : Hydrogrammes collectés pour la crue de février 1997 et mise en correspondance avec la date d'acquisition de l'image Radarsat en période de crue.

Le temps de retour de la crue de février 1997 a été estimé à 4 ans par la DIREN à partir du débit de pointe enregistré à Uckange (donnée DIREN lorraine). La comparaison des hydrogrammes amont et aval montre une incohérence en terme de volume écoulé dans la plaine au cours de la crue de février 1997. En effet, le volume écoulé est plus important à l'aval qu'à l'amont alors qu'il n'y a a priori aucun apport important au sein de la zone d'étude. Cette incohérence sera analysée plus en détail dans le paragraphe 8.3.2.2.

Par ailleurs, les hydrogrammes indiquent que la prise de vue Radarsat-1 du 28 février a eu lieu quelques heures après le passage du pic de crue : respectivement 1h à l'aval et 15h et à l'amont de la zone d'étude, c'est à dire au début de la période de décrue.

Les données de télédétection

Pour le site d'étude de la Moselle, nous avons exploité une image radar, acquise en période de crue le 28 février 1997 à 5h57 par le satellite RADARSAT-1 (orbite descendante, faisceaux standards S2, angle de visé moyen sur la zone d'étude $\sim 26^\circ$). Cette image a par ailleurs été obtenue dans le cadre du Projet PACTES. Son niveau de prétraitement est Systematic Map Image. Le satellite RADARSAT 1 acquiert des images en bande C (longueur d'onde 5,6 cm), en polarisation Horizontale-Horizontale (HH). Sur ces images, la détection des surfaces inondées est relativement aisée, mais susceptible d'être fortement perturbée par la présence de vent ou de fortes précipitations dans le cas où les vaguelettes générées par ces intempéries ont des dimensions verticales supérieures à 2,8 cm. Sur l'image RADARSAT 1, le pixel de base a une taille de 12,5 m et la Résolution Spatiale Effective est de l'ordre de 25-30 m.

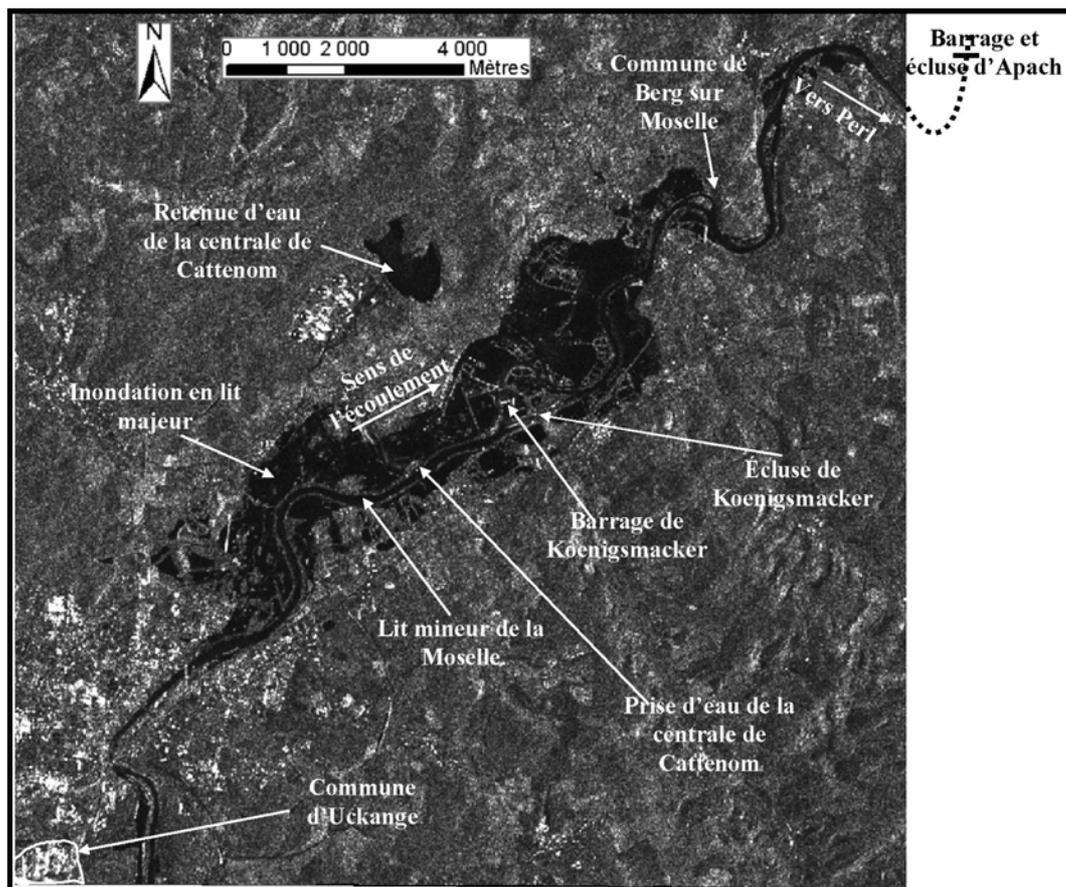


Figure 7.5 : Image RADARSAT-1 du 28 février 1997 et site d'étude.

Cette image a été géoréférencée sous Système d'Information Géographique par saisie de points d'amer sur la carte IGN de la zone d'étude au 25000^{ème}. Grâce à la digitalisation de 10 points de contrôle repartis sur l'ensemble de l'image, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) à l'issue du géoréférencement a pu être estimée à environ 10 m, valeur inférieure à la dimension d'un pixel de l'image.

Cinq photographies aériennes IGN au 15000^{ème}, acquises hors période de crue en 1999, couvrant la totalité de la plaine de la Moselle dans la zone d'étude, ont été orthorectifiées et mosaïquées. La RMSE à l'issue de l'orthorectification est inférieure à 10m. L'ortho-photographie ainsi générée a permis, par photo-interprétation, de cartographier l'ensemble des zones urbaines et végétalisées (végétation haute : forêts, arbres isolés, haies...) dans la plaine d'inondation.

Les données topographiques et bathymétriques - création d'un Modèle Numérique de Terrain

Les données topographiques brutes ont été fournies par les Services de la Navigation du Nord-Est (SNNE) sous forme de points cotés et de lignes de structures 3D générés par photogrammétrie à partir de photographies aériennes au 8000^{ème}. Pour chaque ligne et chaque point sont connues les coordonnées géographiques (X,Y) en projection Lambert 1, et l'altitude Z en référentiel IGN69. La densité spatiale des points et lignes est irrégulière. Elle est d'autant plus importante que les variations d'altitude sont fortes (la plus petite distance entre deux points est de l'ordre de 60cm). Les lignes

représentent des courbes de niveaux et des « structures topographiques » de la plaine (e.g. : digues, talus, gravières, routes, voies ferrées, etc.). L'incertitude altimétrique moyenne des données brutes est de l'ordre de $\pm 25\text{cm}$.

Les données bathymétriques ont été fournies par les Services de la Navigation du Nord-Est sous forme de points cotés. Elles sont issues de mesures par sondeur bi-fréquence (210/33KHz) sur une embarcation mobile. Le positionnement du mobile est réalisé par GPS Différentiel centimétrique. La fréquence 210 kHz est utilisée pour déterminer la profondeur des sondages. Les précisions planimétriques et altimétriques de ces données sont centimétriques.

A partir des données topographiques et des données bathymétriques brutes, nous avons généré un modèle numérique de terrain en réseau de triangles irréguliers (TIN), par une interpolation linéaire entre les points et lignes cotées sur des facettes triangulaires construites suivant le critère de Delaunay (ESRI, 2005). Le TIN a ensuite été converti au format « RASTER » (image) pour pouvoir être superposé aux données images. La taille du pixel du MNT a été définie à 7 m conformément au théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, inférieure à la moitié des dimensions spatiales des plus petites structures topographiques représentées par les données brutes (~ 15-20 m). Dans la suite du document, le sigle « MNT » désignera les données topographiques interpolées au format RASTER.

7.2 Les sites d'étude complémentaires

7.2.1 L'Alzette entre Steinsel et Mersch

7.2.1.1 *La rivière Alzette et le site d'étude*

La rivière Alzette prend sa source en France, à environ 4 km en amont de la frontière luxembourgeoise (Figure 7.6). Son bassin-versant a une superficie de 1172 km² à la confluence de l'Alzette avec la Sûre, qui elle-même se jette dans la Moselle.

Dans la partie nord du bassin, le Gutland, on rencontre deux grands types de sols aux comportements hydriques très différents (Observatoire Hydro-Climatologique du Grand Duché du Luxembourg, 2004):

- des sols argileux à argilo-limoneux issus de marnes (roche argileuse imperméable), peu profonds, peu perméables. Ils sont sujets à des engorgements d'eaux et des inondations en période automnale et hivernale.
- des sols sableux à limono-sableux issus des grès du Luxembourg. Ce sont des sols perméables et aérés mais ils souffrent, à l'opposé des sols argileux, de déficit hydrique en été.

Dans la partie sud du bassin, l'Oesling, les roches schisteuses sont responsables de sols très caillouteux, à texture limoneuse.

Les sols développés sur les alluvions récents déposés dans les vallées par les rivières vont des argiles aux sables et peuvent souffrir d'excès hydriques.

La bordure occidentale du Grand-Duché de Luxembourg est très pluvieuse : 900 à 1000 mm/an - moyenne 1995-1998- (Figure 7.7). Sur la bordure orientale du bassin de l'Alzette, les totaux pluviométriques annuels n'atteignent plus que 700 à 800 mm (moyenne 1995-1998) (Pfister L., 2000).

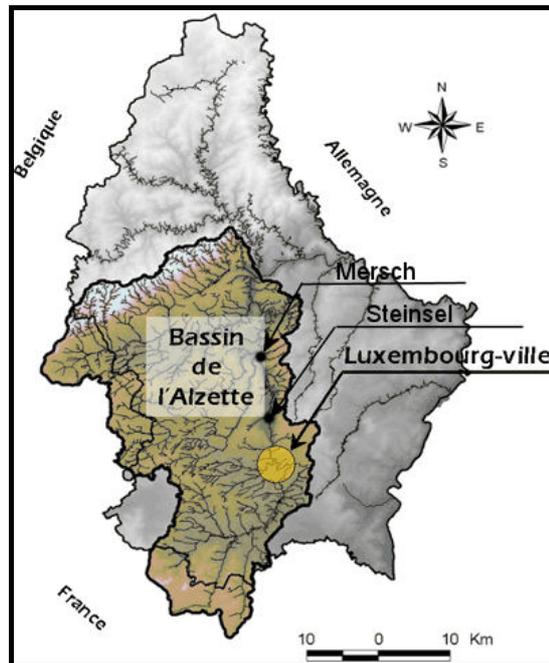


Figure 7.6 : Bassin versant et site d'étude de l'Alzette (Observatoire Hydro-Climatologique du Grand Duché du Luxembourg, 2004)

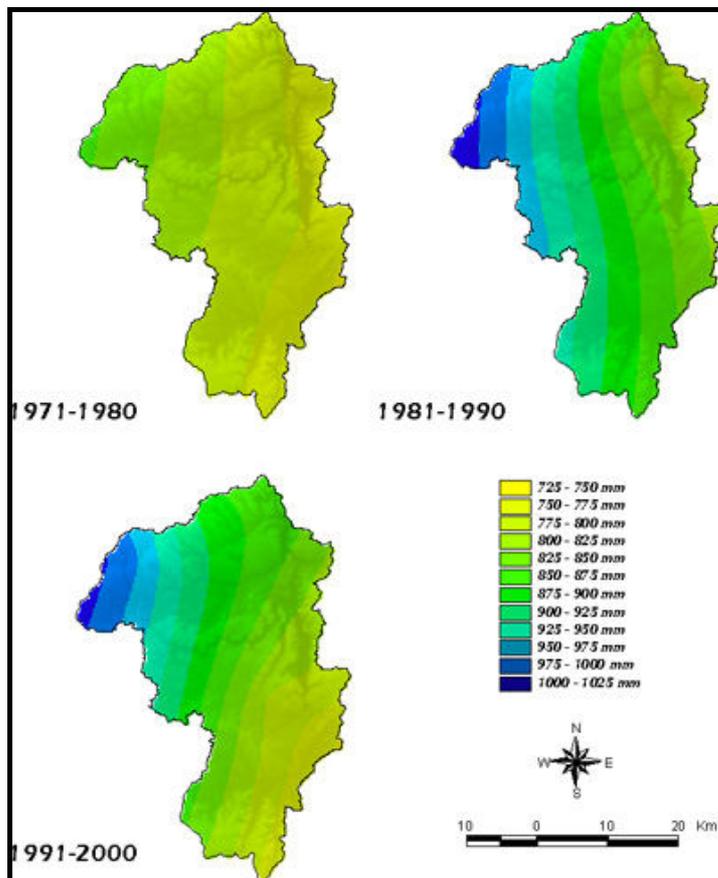


Figure 7.7 : Régime pluviométrique du bassin versant de l'Alzette (Pfister L., 2000).

Les cours d'eau du bassin versant de l'Alzette sont caractérisés par un régime de type pluvial océanique, avec des hautes eaux centrées sur l'hiver (maximum en février) et des basses eaux d'été (minimum en septembre) (Pfister L., 2000).

7.2.1.2 Site d'étude et constitution d'une base de données

Les données hydrométriques et hydrauliques

Le site étudié est un tronçon de 10 km de l'Alzette entre les communes de Streinsel - amont - et Mersch - aval - (Figure 7.6, p. 134). Dans cette zone, l'Alzette s'écoule dans une plaine d'une largeur d'environ 1km relativement antropisée. La crue étudiée est survenue en janvier 2003. Son temps de retour a été estimé à 5 ans sur le débit de pointe enregistré à Steinsel (Matgen et al., 2004) (Figure 7.8).

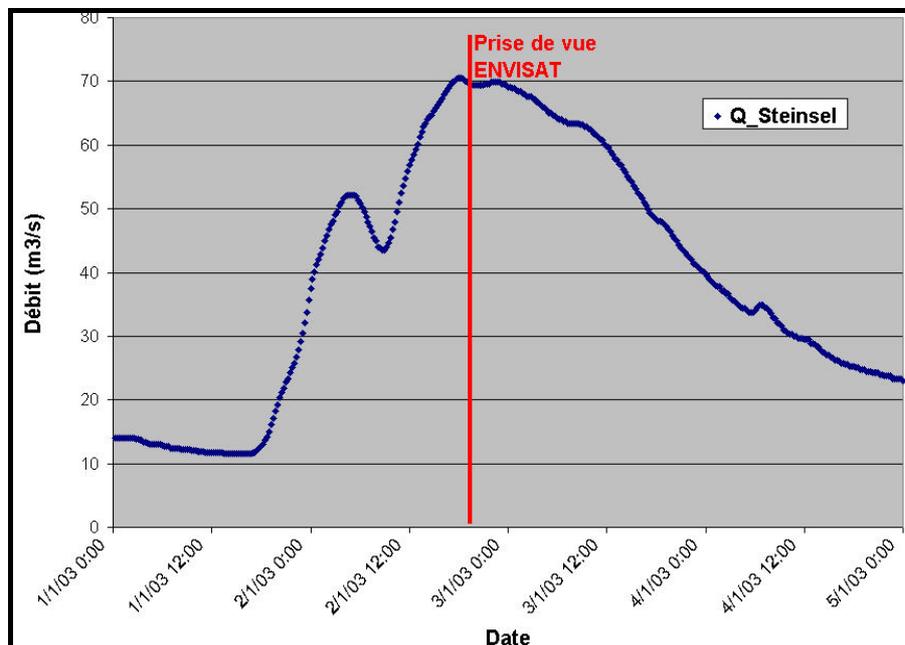


Figure 7.8 : Hydrogramme observé à Steinsel pour la crue de janvier 2003 et date d'acquisition de l'image satellitaire ENVISAT.

Des relevés GPS des Plus Hautes Eaux ont par ailleurs été effectués en plusieurs points de la plaine. L'incertitude altimétrique de ces relevés a été estimée de l'ordre de ± 15 cm (Schumann et al., 2006). Ces PHE sont disponibles pour 9 profils en travers en travers d'un modèle hydraulique monodimensionnel de l'Alzette développé au Centre de Recherche public Gabriel Lippmann (Figure 7.9A).

Les données de télédétection

L'image satellitaire radar de crue exploitée a été acquise par le satellite ENVISAT le 2 janvier 2003 à 22h18, soit à peu près au moment du passage du pic de crue dans la plaine. C'est pourquoi, il est supposé que l'étendue inondée observée sur cette image satellitaire correspond à l'extension maximale des eaux au cours de la crue. L'image a été acquise en double polarisation VV-VH, en bande C (5,6 cm), avec un angle d'incidence moyen de 35° . Sur cette image, la taille du pixel est de 12,5 pour

une résolution spatiale effective de l'ordre de 25-30 m. Cette image a été orthorectifiée (RMSE 12 m) et a permis d'obtenir une carte d'inondation par seuillage radiométrique, lors de travaux (Matgen et al., 2004; Schumann et al., 2006) effectués au CRP Gabriel Lippmann (Figure 7.9B). Dans ces travaux, la valeur du seuil a été déterminée grâce à des mesure GPS de laisses de crue.

Par ailleurs, une image satellitaire optique IKONOS (acquise en été 2000) hors crue a pu être exploitée pour connaître de façon fine l'occupation du sol dans la plaine. Cette image possède trois bandes spectrales - bleu, vert et rouge - et a une résolution spatiale de 1m.

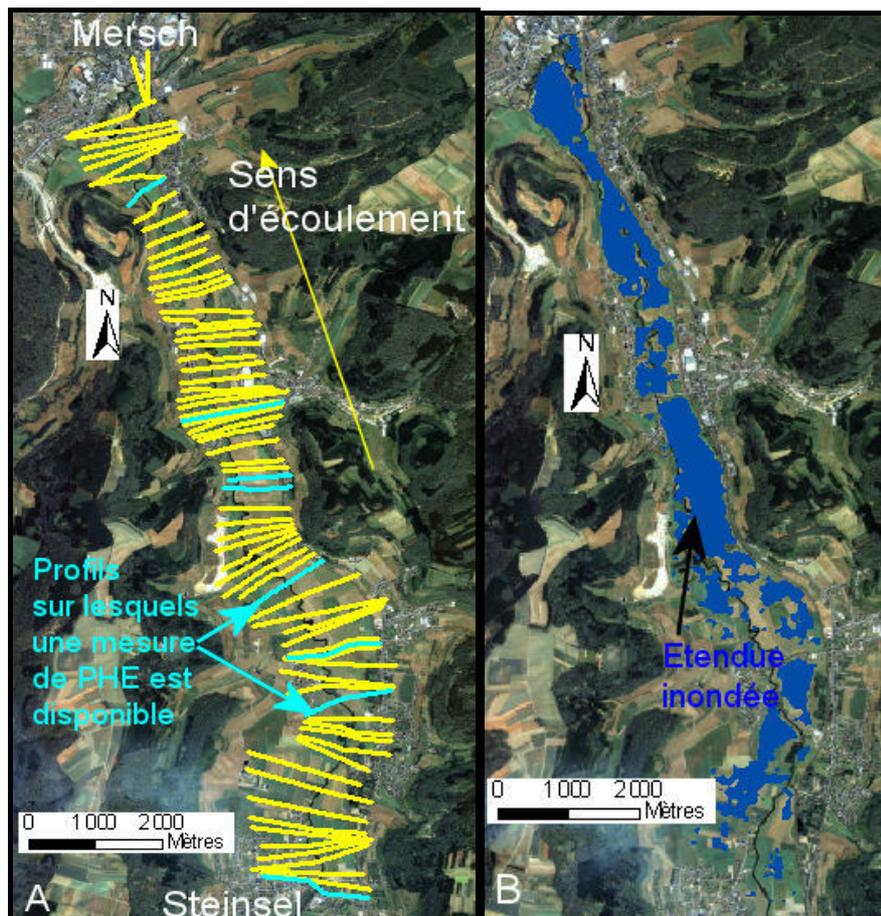


Figure 7.9 A et B : A profils en travers du modèle hydraulique 1D de l'Alzette (Matgen et al., 2004) et mesures de PHE, et B étendue inondée extraite de l'image ENVISAT du 2 février 2003, sur fond d'une image satellitaire optique IKONOS (résolution spatiale 1m).

Les données topographiques

Pour ce site d'étude, un Modèle Numérique de Terrain LiDAR a été acquis au CRP Gabriel Lippmann. Ce MNT est au format RASTER, avec une taille de pixel de 2 m et une précision altimétrique de ± 15 cm (Schumann et al., 2006).

7.2.2 La Meuse entre Dieue sur Meuse et Charleville-Mézières

7.2.2.1 *Le bassin versant de la Meuse*

La Meuse est un fleuve international qui draine le territoire français, la Belgique, l'Allemagne et les Pays-Bas sur un parcours d'environ 950km. Le fleuve Meuse prend sa source au pied du plateau de Langres à Pouilly en Bassigny (Haute Marne) à 384 m d'altitude. Son bassin versant hydrographique est de 36000km², dont 7800km² en France - données de l'Établissement Public d'Aménagement de la Meuse et de ses Affluents (EPAMA[®]). Les principaux affluents de la Meuse sont le Vair, la Chiers, la Semoy (sur 21 km en France), le Viroin (4km en France) et la Houille (14 km en France) (Agence de l'eau Rhin-Meuse[®]).

Le climat du bassin versant de la Meuse est océanique à influence continentale (EPAMA[®]) avec des cumuls de précipitation mensuels moyens compris entre 70 et 110mm (Météo France[®]).

7.2.2.2 *Site d'étude et constitution d'une base de données*

Le site d'étude concerne un tronçon de 160km entre Verdun et Charleville-mézières dans lequel la Meuse a un parcours méandreux qui traverse alternativement plaines agricoles, gorges et agglomérations urbaines. La largeur du lit majeur de la Moselle y oscille entre quelques dizaines de mètre et 2 à 3 km. Au sein de la zone d'étude, le principal affluent de la Meuse est la Chiers.

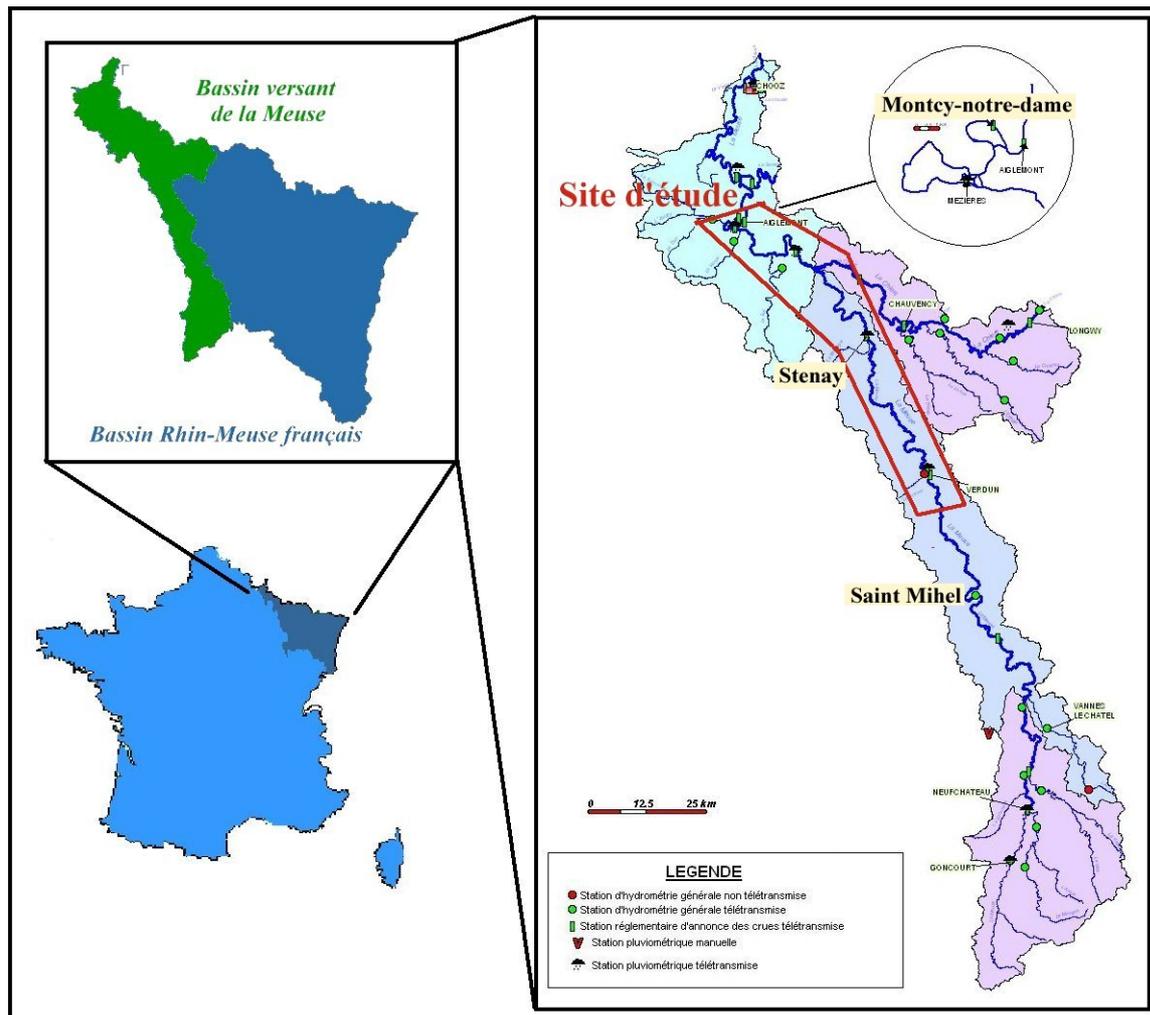


Figure 7.10 : Bassin versant de la partie française de la Meuse et site d'étude - inspiré de (DIREN Lorraine[®]).

Évènement hydrologique et données hydrométriques

La crue de décembre 1993 - janvier 1994 est composée de deux pics successifs. Le premier a été enregistré le 22 décembre à St Mihiel (amont). Après un début de décrue, une recrue a eu lieu et son pic a été enregistré à la même station le 9 janvier.

Grâce à la banque HYDRO (Banque Hydro[®]), et les synthèses hydrologiques des stations qui y sont proposées, les temps de retours suivants ont été estimés à partir des débits journaliers maximum pour les deux pics de crue :

- entre 3 et 4 ans pour les deux pics à Saint Mihiel
- entre 7 et 8 ans et 5 ans à Stenay pour le premier et deuxième pic respectivement
- de l'ordre de 25 ans à Montcy-notre-Dame (une seule valeur en raison de l'absence de mesure de débit pour le deuxième pic : station hydrométrique non fonctionnelle).

La différence d'ampleur entre Stenay et Montcy-notre-Dame s'explique en particulier par la présence d'affluents en crue entre ces deux stations.

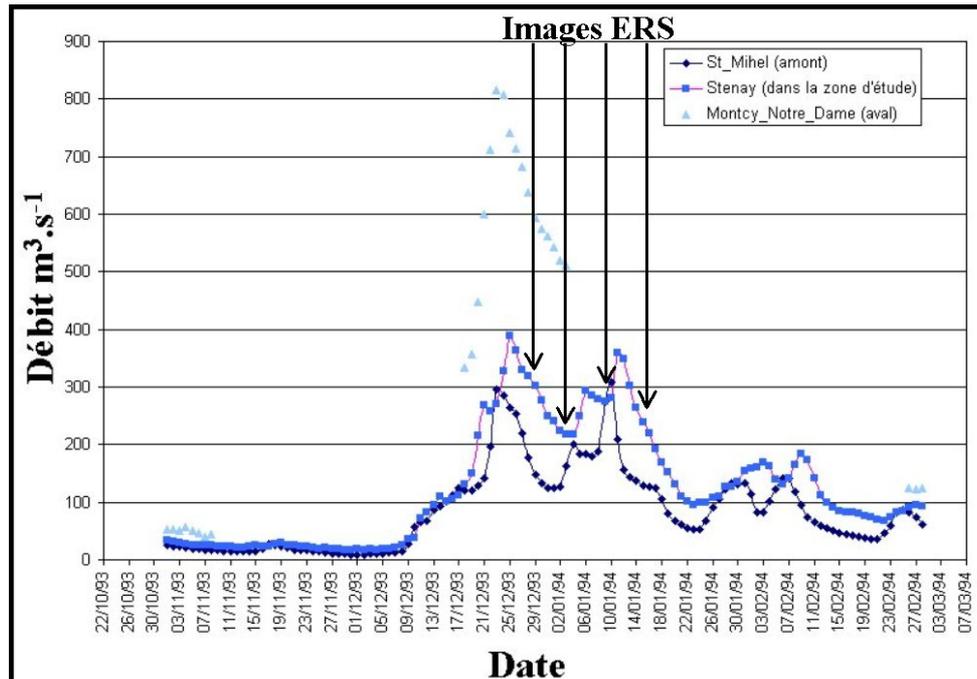


Figure 7.11 : Hydrogrammes enregistrés aux stations hydrométriques sur la Meuse fin 1993/ début 1994 (les flèches noires indiquent les dates d'acquisition des images ERS).

Les données de télédétection

Dans le cadre de la thèse, 4 images radar en période de crue ont pu être acquises. Ce sont des images ERS (bande C, longueur d'onde 5,7cm, polarisation VV, angle de visé moyen 23°), acquises les 28 décembre 1993, 3, 9, et 15 janvier 1994 à 21h47 (pour les 4 images), en orbites ascendantes. Leur niveau de prétraitement est PRécision Image (PRI : taille du pixel=12,5m et Résolution Spatiale Effective de l'ordre de 25-30m).

Ces images ont été géoréférencées sous SIG par saisie de points d'amer sur les cartes IGN de la zone d'étude au 25000^{ème}. Grâce à la digitalisation de points de contrôle, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) à l'issue du géoréférencement a pu être estimée à environ 12.5 m, valeur égale à la dimension d'un pixel de l'image. Les images brutes géoréférencées sont présentées en Annexe 3.

7.2.3 L'Hérault entre Pézenas et Agde

7.2.3.1 Le site d'étude

Le fleuve Hérault est situé dans le sud de la France à proximité de la ville de Montpellier. Il prend sa source au mont Aigoual, sur le versant sud des Cévennes à 1228 m d'altitude et se jette dans la mer Méditerranée à Agde, 150 kilomètres plus loin. La partie du bassin versant étudiée, la basse vallée de l'Hérault, s'étend entre Pézenas et Agde sur une vingtaine de kilomètres dans l'axe nord-sud. Cette zone a été choisie car elle est représentative des inondations de plaines en climat méditerranéen et a déjà été étudiée dans le cadre de la thèse de (Raclot, 2003a), offrant ainsi potentiellement un moyen de comparaison entre différents supports de télédétection et entre crues de temps de retour différents.

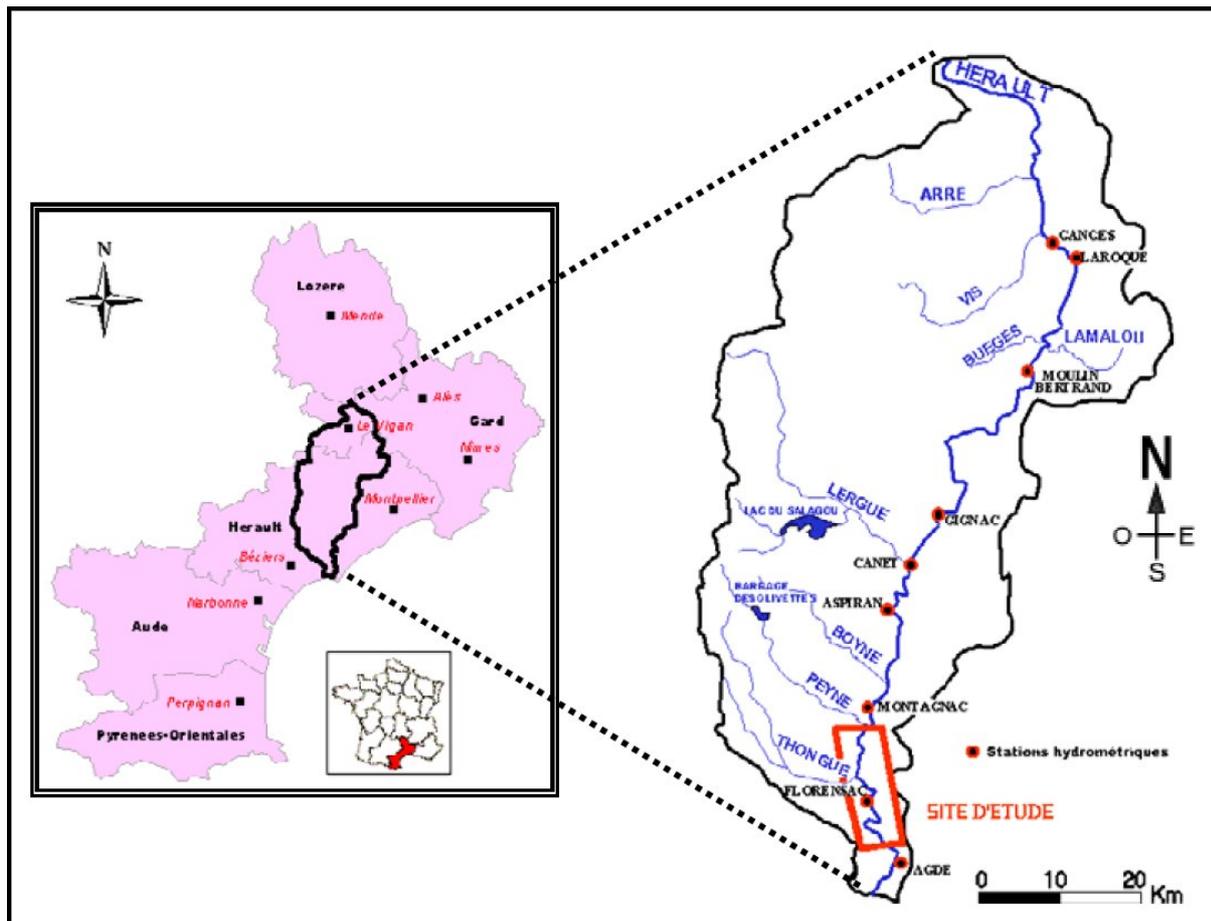


Figure 7.12 : Bassin versant de l'Hérault, site d'étude et station hydrométriques (Raclot, 2003a).

7.2.3.2 Contexte hydrologique de la crue de décembre 2003

Le passage du pic de crue (Figure 7.4, p.131) dans la zone d'étude a été enregistré le 4 décembre (Banque Hydro[®]), soit quatre jours avant la date d'acquisition des images et des photographies aériennes. Cette postériorité à la date de passage du pic de crue implique une dynamique d'écoulements de type décrue « avancée », c'est à dire en présence de retenues d'eau parfois isolées, en phase de vidange, connectées ou non entre elles ou avec le lit mineur de la rivière. Par ailleurs, le débit maximal de l'Hérault à Agde permet d'estimer le temps de retour de la crue étudiée à environ 10 ans (Banque Hydro[®]).

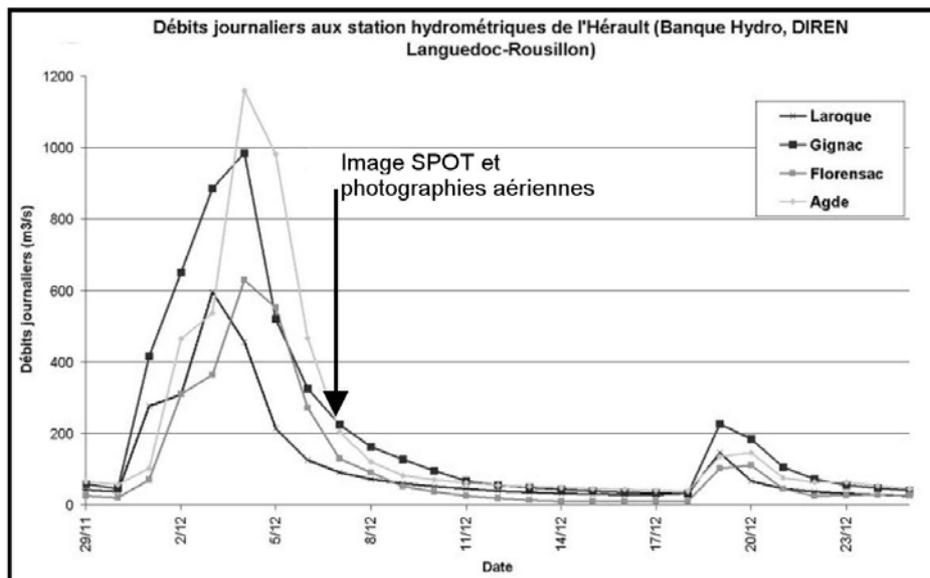


Figure 7.13 Hydrogrammes enregistrés aux stations hydrométriques sur l'Hérault fin 2003 (la flèche noire indique la date d'acquisition de l'image SPOT4 et des photographies aériennes).

7.2.3.3 Les données de télédétection

Sur la zone d'étude une image (SPOT 4) a été acquise en période de crue, le 7 décembre 2003 à 10h40 (angle de visée moyen $-13,8^\circ$). Elle a une taille de pixel de 20 m et possède 4 bandes spectrales : vert (B3), rouge (B2), proche infrarouge (B1), et moyen infrarouge (B4) (Figure A 6.1).

De plus, une image SPOT 5 hors période de crue a été exploitée (taille du pixel 2,5m, bandes spectrales vert, rouge et PIR, angle de visée moyen $-16,5^\circ$).

Ces deux images ont été géoréférencées sous Système d'Information Géographique (SIG) par saisie de points d'amer.

Par ailleurs, des photographies aériennes verticales, en noir et blanc au 15000^{ème}, issues d'une campagne IGN, ont été acquises. Elles proviennent d'une caméra à chambre métrique et sont datées du 7 décembre 2003 entre 9h30 et 11h00, soit dans un laps de temps d'une heure et demie autour de la date d'acquisition de l'image SPOT 4. Étant donné qu'à cette date, l'Hérault était en période de décrue avancée, avec des dynamiques d'écoulement relativement lentes, on peut considérer que ce laps de temps n'a pas permis d'évolutions significatives de la position et de l'étendue de la zone inondée. On considérera donc que les photographies aériennes et la scène SPOT4 permettent d'observer la même étendue inondée.

Ces photographies ont été orthorectifiées afin de pouvoir être superposées avec les autres données spatiales au sein d'un SIG.

A l'issue du géoréférencement de l'image satellitaire SPOT 4 et de l'orthorectification des photographies aériennes nous avons réduit les erreurs quadratiques moyennes (RMS) à moins de 15 mètres, ce qui est inférieure à la taille du pixel SPOT 4.

Chapitre 8.

Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.

Sommaire

8.1	Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.	144
8.1.1	Prétraitements de l'image radar	144
8.1.2	Classification « eau-non eau » sur l'image	144
8.1.3	Extraction d'une carte d'inondation certaine	145
8.1.4	Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.	147
8.1.5	Conclusion	150
8.2	Estimation des niveaux d'eau	151
8.2.1	Estimation primaire de niveaux d'eau par croisement entre les segments informatifs et un MNT à haute résolution spatiale	151
8.2.2	Construction d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs	151
8.2.3	Réduction des incertitudes d'estimation des niveaux d'eau par mise en cohérence hydraulique	153
8.2.4	Conclusion	155
8.3	Intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique	155
8.3.1	Mise en place d'un modèle hydraulique sur le site de la Moselle	156
8.3.1.1	Les équations du modèle.	156
8.3.1.2	Définition de la géométrie du modèle	157
8.3.2	Mise en place des simulations Monte-Carlo	160
8.3.2.1	Les paramètres du modèle	160
8.3.2.2	Calage préalable grâce aux hydrogrammes mesurés	161
8.3.2.3	Intégration d'une carte des étendues inondées dans la procédure de calage	164
8.3.2.4	Intégration des estimations des niveaux d'eau satellites dans la procédure de calage	167
8.3.3	Conclusion	170

Ce chapitre présente, l'application de la méthode proposée aux chapitres 5, 6 et 7 sur le site d'étude de la Moselle. En lien avec le plan établi dans la partie méthodologique, il est composé de trois paragraphes :

- cartographie de l'étendue et des limites d'inondation,
- estimation des niveaux d'eau,
- intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique.

8.1 Cartographie de l'étendue et des limites d'inondation.

8.1.1 Prétraitements de l'image radar

Sur le site de la Moselle, l'image radar exploitée est une image RADARSAT-1 (Figure 7.5). La taille du pixel de l'image radar est égale à 12,5m et sa Résolution Spatiale Effective est de l'ordre de 25-30m (RADARSAT, 2000). A la date d'acquisition (28 février 1997) de l'image satellitaire radar, la vitesse du vent était modérée : 7 m.s^{-1} (donnée Météo France) à l'aéroport de Metz. Par conséquent, nous avons supposé les effets dus au vent suffisamment restreints pour qu'ils ne perturbent pas la détection de l'eau sur l'image radar.

Sur cette image, l'ENL a pu être estimée à 11 sur une zone de forêt à proximité de la centrale de Cattenom. Les valeurs moyennes des intensités de la forêt et de l'eau libre sur l'image radar d'inondation ont pu être estimées respectivement à 7100 ($\overline{\sigma_{\text{forêt}}^0} \sim -9\text{dB}$) et 2000 ($\overline{\sigma_{\text{eau}}^0} = -20\text{dB}$). Pour estimer ces valeurs, la cartographie de zones de forêt hors du champ d'inondation et des eaux permanentes a été effectuée par photo-interprétation sur les photographies aériennes au 25000^{ème}. Les classes d'occupation du sol forêt et eaux permanentes ainsi obtenus ont ensuite été croisés avec l'image radar afin de calculer les statistiques locales de l'intensité radiométrique.

Avec une ENL de 11 et une hypothèse de distribution Gamma du chatoiement (Cf. §4.1), les intervalles de confiance à 90% des distributions du chatoiement pour les couvertures forêt et eaux permanentes ont pu être estimés à : $\text{IQ}_{\text{chatoiement_eau}} = (Q_{\text{eau}}^{5\%}; Q_{\text{eau}}^{95\%}) = (1200; 3400)$ et $\text{IQ}_{\text{chatoiement_forêt}} = (Q_{\text{forêt}}^{5\%}; Q_{\text{forêt}}^{95\%}) = (4300; 11900)$. Ces intervalles sont disjoints. En conséquence, compte tenu des réflexions menées au paragraphe 4.1, nous avons estimé qu'aucun filtrage n'était nécessaire sur l'image radar.

8.1.2 Classification « eau-non eau » sur l'image

Conformément à la méthode de classification eau-non eau présentée au paragraphe 4.2, nous proposons d'appliquer un double seuillage radiométrique sur l'image aux valeurs S_{min} et S_{max} pour cartographier l'étendue inondée. Pour rappel, la valeur de seuil par défaut S_{min} , vise à repérer les pixels totalement inondés, et la valeur par excès S_{max} vise à repérer les pixels totalement et partiellement inondés. Comme proposé au paragraphe 4.2, la valeur de seuil S_{min} a été fixée à $S_{\text{min}} = Q_{\text{eau}}^{95\%} = 3400$ (correspondant à $\overline{\sigma_{S_{\text{min}}}^0} \sim -15\text{dB}$). Pour déterminer la valeur de seuil S_{max} , les valeurs moyennes des intensités radiométriques de l'eau libre et de la prairie ont été estimées par croisement entre image radar et classes d'occupation du sol eaux permanentes et prairie, construites par photo-interprétation sur les photographies aériennes, et l'image radar. Les valeurs d'intensités radiométriques ainsi estimées sont : $I_{\text{pr}} = 9000$ ($\overline{\sigma_{\text{pr}}}^0 \sim -7\text{dB}$) et $I_{\text{eau}} = 2000$ ($\overline{\sigma_{\text{eau}}}^0 \sim -20\text{dB}$). En conséquence, $S_{\text{max}} = \frac{(\overline{I_{\text{eau}}} + \overline{I_{\text{pr}}})}{2} = 5500$ ($\overline{\sigma_{S_{\text{max}}}^0} = -12\text{dB}$). Nous avons retenu les valeurs de seuil suivantes, en

décibel : $\sigma_{S_{\max}}^0 = -12\text{dB}$ et $\sigma_{S_{\min}}^0 = -15\text{dB}$. Le double seuillage radiométrique de l'image radar permet d'obtenir une première carte d'inondation avec des limites floues (Figure 8.1, p.146). Sur cette carte, la taille du pixel est conservée égale la taille initiale sur l'image radar : 12,5m. Les pixels de la carte d'inondation radar ainsi obtenue peuvent avoir trois valeurs: 0 = terre, 1 = eau, 2 = limite floue. Sur la Figure 8.1 (p.146), on constate la présence de nombreuses petites surfaces déclarées inondées par la carte d'inondation qui sont potentiellement dues aux effets du chatoisement et non à la présence d'eau. Ces sur-détections vont être éliminées de la carte d'inondation (Cf. paragraphe suivant).

8.1.3 Extraction d'une carte d'inondation certaine

Nous allons maintenant exploiter la carte d'inondation pour déterminer les zones dans lesquelles la présence ou l'absence d'eau est certaine. L'objectif est d'obtenir une carte d'inondation certaine qui pourra être exploitée pour le calage d'un modèle hydraulique et pour une estimation des niveaux d'eau. Pour cela deux traitements vont être appliqués à la carte d'inondation certaine. Le premier vise à éliminer les sur-détections, c'est à dire les zones déclarées inondées par la carte d'inondation mais qui ne le sont pas dans la réalité. Le second vise à déterminer, au sein de la carte d'inondation, les zones dans lesquelles des sous-détections - c'est à dire des zones inondées non représentées sur la carte d'inondation - sont susceptibles de se produire.

Traitement des « sur-détections »

Les sur-détections proviennent principalement d'effet d'ombrage et d'effets dus au chatoisement. Dans la plaine d'inondation de la Moselle (partie en amont de Berg sur Moselle) nous n'avons détecté aucun phénomène d'ombrage. Les seules zones d'ombrage identifiées sont situées au sein des gorges en aval du village de Berg sur Moselle. A l'aval de ce village, le fort engorgement de la rivière rend l'image relativement inefficace pour notre problématique. En effet, un fort engorgement implique des pentes du terrain fortes, qui sont responsables de phénomènes d'ombrage importants et d'une incertitude forte sur l'estimation des niveaux d'eau. En conséquence, nous avons choisi de restreindre l'analyse de l'image radar du 28 février à la plaine d'inondation, entre Uckange et Berg sur Moselle.

Pour supprimer les groupes de pixels isolés de la carte d'inondation, nous avons appliqué la méthode proposée au paragraphe 4.3.1. Pour rappel, cette méthode est basée sur deux traitements :

- Suppression des groupes de pixels isolés de la carte d'inondation par défaut¹⁴ de surface inférieure à 2RSE qui permet d'obtenir une tache radar par défaut épurée.
- Suppression des groupes de pixels isolés de la carte d'inondation par excès qui ne coïncident avec aucun pixel de la tache radar par défaut épurée.

La carte d'inondation obtenue à l'issue de ces traitements est présentée sur la Figure 8.1 B.

¹⁴ Pour rappel, la carte d'inondation par défaut correspond au résultat du seuillage de l'image radar à la valeur S_{\min} et la carte d'inondation par excès au résultat du seuillage à la valeur S_{\max} .

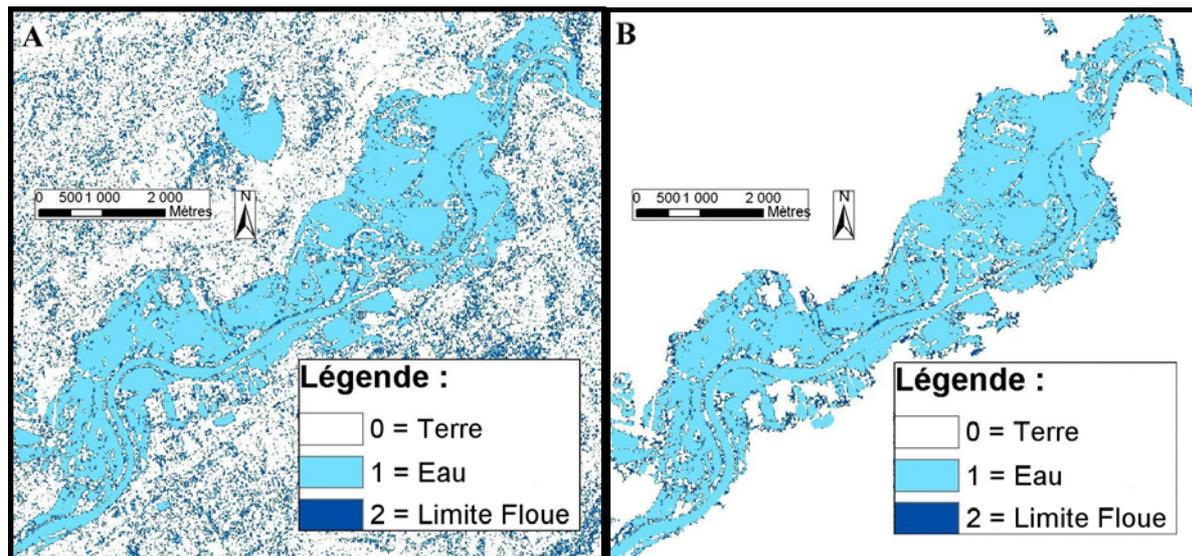


Figure 8.1 A et B : Carte d'inondation aux limites floues obtenue par double seuillage radiométrique, A avant et B après épuración des groupes de pixels isolés.

Traitement des « sous-détections »

Les sous-détections proviennent principalement d'objets qui masquent l'eau sur l'image. Elles ne peuvent être corrigées, mais les zones dans lesquelles elles sont susceptibles de se produire peuvent être cartographiées grâce à des données d'occupation du sol fine.

Les objets qui masquent l'eau proposées dans la méthodologie

Pour traiter les sous détections, nous avons proposé au paragraphe 4.3.2, de cartographier les objets qui masquent l'eau - arbres et bâtiments - afin de les masquer sur la carte d'inondation et d'obtenir une carte d'inondation certaine. La cartographie des objets qui masquent l'eau - arbres et bâtiments - a été réalisée par photo-interprétation sur des photographies aériennes au 25000^{ème} (Figure 8.2A).

Les perturbations supplémentaires identifiées dans le cas de la Moselle

Par ailleurs, l'analyse des « trous » dans la carte d'inondation (zones « Terre » au sein de la zone inondée) a permis d'identifier deux autres types de perturbations : les lignes électriques parallèles à la direction de déplacement du satellite, et les poteaux des lignes électriques à haute tension. Les lignes électriques parallèles à l'orbite du satellite apparaissent, sur l'image, au sein de la zone inondée, sous la forme de traits épais (environ 3 pixels de large), avec des valeurs radiométriques très élevées (de l'ordre de 2dB). Cet effet est a priori d'autant plus marqué dans le cas d'une image RADARSAT à cause de l'acquisition en polarisation HH. En effet, celle-ci induit une sensibilité importante du radar aux objets horizontaux, dont une ligne électrique parallèle à l'orbite du satellite fait partie. La présence de lignes électriques parallèles à l'orbite du satellite ou de poteaux électriques à haute tension au sein de la zone inondée crée dans la carte d'inondation des limites artificielles qui ne correspondent pas aux limites réelles de l'inondation. En conséquence, ces éléments doivent être masquées sur la carte d'inondation afin d'obtenir une carte d'inondation certaine (Figure 8.2B).

La carte d'inondation certaine

Après suppression des sur-détections, nous avons obtenu une carte d'inondation épurée. Cependant, sur cette carte, en présence d'arbres, de bâtiments, de lignes électriques parallèles à l'orbite du satellites et de poteaux électrique à haute tension, l'information concernant la présence ou l'absence d'eau est incertaine. C'est pourquoi, afin de pouvoir exploiter la carte d'inondation dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique, nous proposons de masquer ces zones incertaines. Le résultat de ce masquage est une nouvelle carte de l'étendue inondée au sein de laquelle l'information eau-non eau est certaine. Cette carte, présentée dans la Figure 8.2B sera par la suite appelée « carte d'inondation certaine » et exploitée afin d'extraire des bordures de l'inondation pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau et afin d'aider le calage d'un modèle hydraulique.

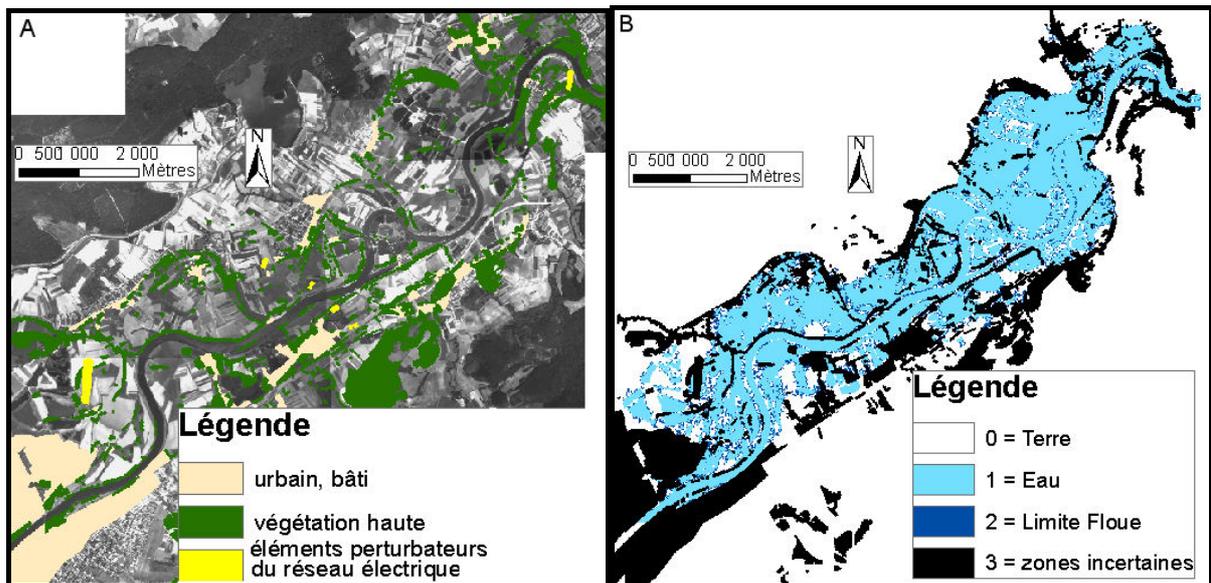


Figure 8.2 A et B : A Identification des zones incertaines et B carte d'inondation certaine

8.1.4 Extraction des bordures pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.

La carte d'inondation certaine fournit les zones au sein desquelles la présence d'eau est certaine. Par ailleurs, comme nous l'avons indiqué au paragraphe 4.4, les limites floues de cette carte ne sont pas nécessairement pertinentes pour une estimation de niveau d'eau par croisement avec un MNT. Cette section vise en conséquence à extraire de la carte d'inondation certaine les bordures de l'inondation qui permettent d'obtenir des estimations précises de niveaux d'eau sous la forme d'intervalle au sein desquels le niveau d'eau réel est inclus.

Extraction des bordures floues et prise en compte de l'incertitude spatiale de positionnement de la limite d'inondation

Les incertitudes de positionnement de la limite d'inondation liées à la présence de pixels partiellement inondés ont été intégrées dans les bordures floues grâce à la technique de cartographie employée. Pour prendre en compte les incertitudes liées à la Résolution Spatiale Effective (~30m) et à la précision de

Géoréférencement de l'image radar (10m), les limites floues de la carte d'inondation certaine sont dilatées à l'aide d'une zone tampon de dimension $V=RSE/2+PG=25m$.

La Figure 8.3 présente les limites floues qui ont été extraites de la carte d'inondation certaine, puis dilatées à l'aide d'une zone tampon.

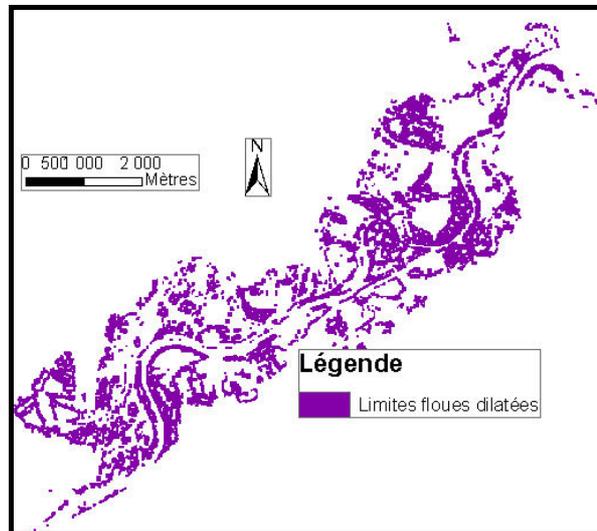


Figure 8.3 : Limites floues extraites de la carte d'inondation certaine, dilatée afin de prendre en compte les incertitudes spatiales

Identification des zones non pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau

Comme indiqué au paragraphe 4.4, les abords des structures topographiques et les eaux permanentes ne permettent pas d'obtenir des estimations précises des niveaux d'eau. En conséquence, les bordures de la carte d'inondation certaine qui coïncident avec ces zones doivent être éliminées de l'analyse dans un objectif d'estimation des niveaux d'eau. Par ailleurs, l'emprise spatiale du MNT utilisé est limitée à des zones de débordement de la rivière dans la plaine d'inondation pour des temps de retour de crue relativement faibles par endroit (information des Services de la Navigation du Nord-Est - SNNE). Lorsqu'une limite d'inondation est située sur les bordures du MNT, l'estimation de niveau d'eau qui en résulte n'est pas fiable. C'est pourquoi, il a été choisi de considérer les bordures du MNT non pertinentes pour l'estimation des niveaux d'eau. Les données topographiques, sous formes de points cotés et de lignes 3D, contiennent en particulier les gravières sous formes de polygones et les structures topographiques (talus et voies de communications surélevées) sous forme de lignes 3D repérant le haut et le bas de celles-ci. Le lit mineur de la Moselle a été cartographié par photo-interprétation sur les photographies aériennes hors crue.

L'ensemble des données identifiant les zones non pertinentes évoquées à ce stade est au format vecteur. La transformation de ces données au format vecteur en RASTER¹⁵ permet de créer une carte des zones non pertinentes. Pour effectuer une fusion cohérente la taille de cellule de cette carte est

¹⁵ Cette transformation vecteur → RASTER est appelée « rasterisation ». À l'inverse, la transformation RASTER → vecteur est appelée « vectorisation ».

prise égale à la taille du pixel de la tache d'inondation radar : 12,5m. L'ensemble des zones non pertinentes évoquées précédemment, ajouté aux zones incertaines de la carte d'inondation permet de construire un masque représentant les zones non pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau que nous appellerons masque « niveau ».

Pour s'affranchir des éventuelles confusions liées à la Résolution Spatiale Effective de l'image radar et le géoréférencement des différentes sources de données, une dilatation du masque niveau a été effectuée. La taille de la zone tampon utilisée pour cette dilatation est : $RSE/2 + \text{Précisions des géoréférencements des images (radar et photographies)} = 15 + 10 + 10 = 35 \text{ m}$. Le masque niveau ainsi obtenu est présenté sur la Figure 8.4 sur fond des photographies IGN au 25000^{ème}.

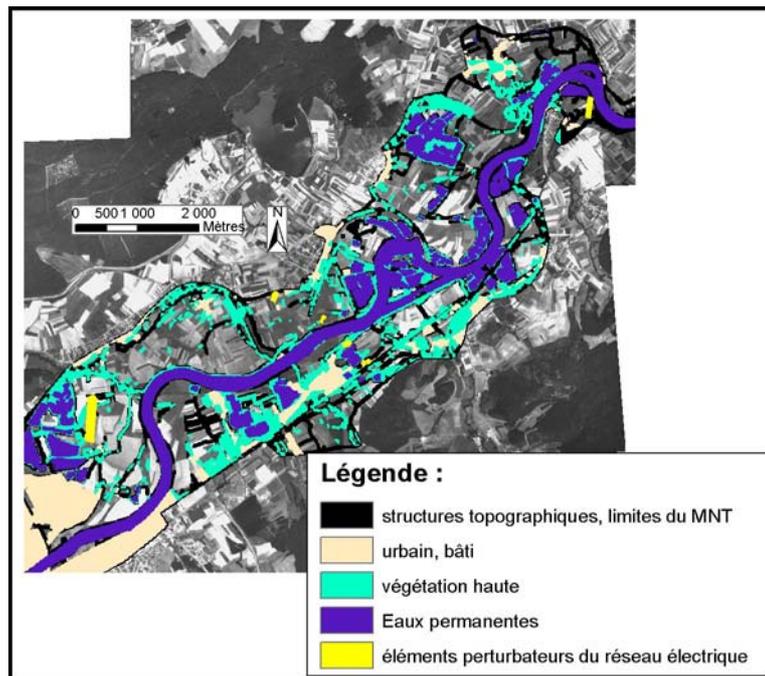


Figure 8.4 : Représentation des cinq éléments constitutifs du masque niveau sur fond des photographies IGN au 25000^{ème}.

Dans la Figure 8.4, les zones non pertinentes sont présentées de différentes couleurs pour plus de lisibilité. En réalité, dans l'application de la méthode, le masque niveau est binaire (1 = pertinent ; 0 = non pertinent).

Extraction des bordures pertinentes pour l'estimation des niveaux d'eau

La fusion des bordures floues de la carte d'inondation avec le masque niveau permet d'éliminer les parties de ces bordures qui ne permettent pas d'estimer des niveaux d'eau de façon précise (Figure 8.5A). Les limites floues pertinentes résultantes sont discontinues sous formes de groupe de pixels qui définissent les segments informatifs (Figure 8.5B). Pour la Moselle, ces derniers sont au nombre de 53.

Suivant les critères de construction présentés au paragraphe 4.3, les segments informatifs sont des groupes de pixels contigus extraits des bordures pertinentes et satisfaisant les critères de taille suivants :

1) La dimension minimale d'un segment informatif pour que le nombre m_i de pixels contenu dans celui-ci SI_i soit représentatif vis à vis de l'image radar est prise égale 60m, c'est à dire de l'ordre de grandeur du double de la Résolution Spatiale Effective de cette dernière. Cette taille a été jugée adaptée car elle permet d'inclure des limites de l'inondation dont la longueur est au moins égale à une cellule de résolution radar. Pour appliquer ce critère de taille, l'ensemble des segments informatifs dont l'aire est inférieure à $(2RSE)^2=3600m^2$ ont été supprimés.

2) La dimension maximale d'un segment informatif dans la direction de l'écoulement est prise égale à 400m pour que le niveau d'eau N_e^i puisse y être considéré sensiblement constant, i.e. que ses variations soient inférieures à la précision attendue $\Delta N_e = 20$ cm - valeur obtenue par Raclot (Raclot, 2003a). En supposant que la pente locale de la ligne d'eau en tout point de la plaine est inférieure ou égale à la pente moyenne de la rivière p , les variations de niveaux d'eau dans l'axe d'écoulement au sein d'un segment de longueur ΔX sont inférieures à $\Delta X * p$. La taille maximale correspondant à une pente de 0,0005 est alors de 400m. Ce critère impose qu'un segment informatif de dimension supérieure à 400m dans la direction de l'écoulement soit découpé pour que le niveau d'eau puisse y être considéré sensiblement constant. Ce découpage sera effectué après définition d'un schéma de circulation des eaux au sein de la plaine.

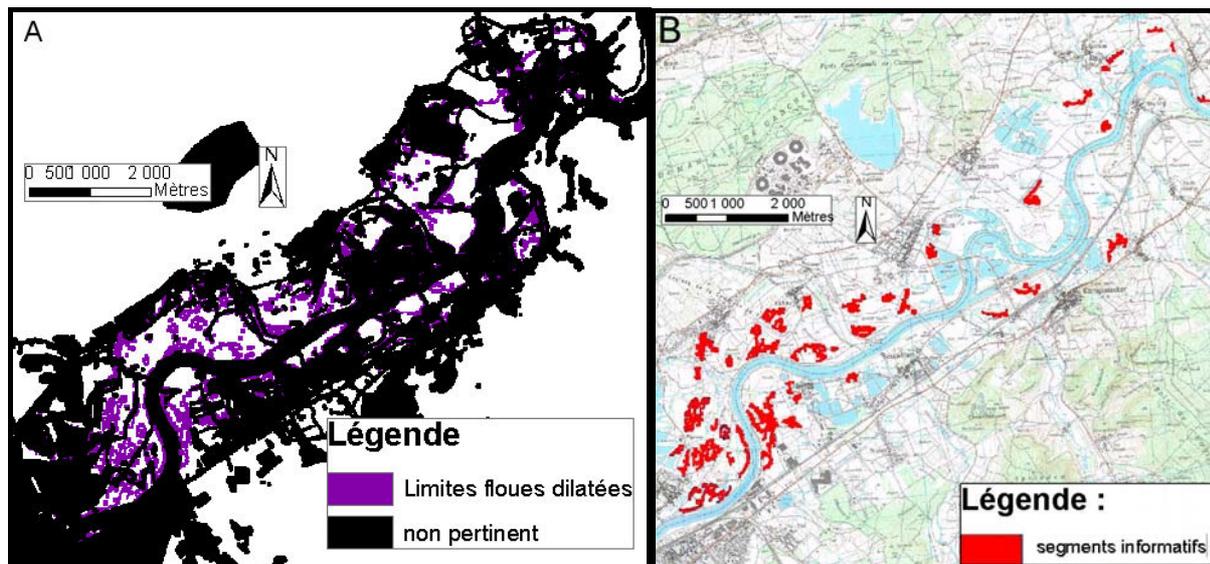


Figure 8.5 A et B : A Application du masque niveau aux limites floues et B segments informatifs résultants.

8.1.5 Conclusion

Grâce à une analyse des incertitudes et des erreurs potentielles dans l'extraction d'une étendue inondée à partir d'une image satellitaire radar, il a été possible d'extraire une carte d'inondation au sein de laquelle l'information eau-non eau est certaine. Cette carte d'inondation certaine a un double intérêt car elle va pouvoir être par la suite intégrée dans un modèle hydraulique et qu'elle permet d'extraire

des bordures de l'inondation pertinentes pour une estimation de niveaux d'eau. De plus, grâce à l'élimination des parties des bordures floues de la carte d'inondation certaine qui ne permettent pas d'estimer des niveaux d'eau de façon précise par croisement avec un MNT fin, il a été possible de construire des segments informatifs. Les segments informatifs sont le point de départ de l'estimation des niveaux d'eau.

La volonté générale dans la démarche a été d'épurer progressivement l'information initiale fournie par une image radar afin de ne conserver, au final, que sa partie la plus utile pour la modélisation hydraulique et l'estimation de niveaux d'eau. Dans le cas de l'estimation de niveaux d'eau, la partie utile (les segments informatifs), ne constitue qu'une toute petite part de l'information initiale du radar. En effet, les segments informatifs ne représentent que de l'ordre de 1% de la carte d'inondation initiale extraite de l'image radar, ce qui montre que la partie de l'information initiale fournie par l'image qui va être utilisée pour estimer des niveaux d'eau est très faible.

8.2 Estimation des niveaux d'eau

La méthode d'estimation de niveau d'eau proposée au Chapitre 5 vise à quantifier la distribution spatiale des niveaux d'eau dans la plaine d'inondation, à l'instant d'acquisition d'une image satellitaire, sous la forme d'intervalles dont les tailles sont compatibles avec les précisions requises dans le cadre de la modélisation hydraulique.

Elle repose sur l'analyse spatiale des segments informatifs suivant trois phases :

- estimation primaire de niveaux d'eau par croisement des segment informatifs avec un MNT fin,
- construction d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs,
- mise en cohérence hydraulique des estimations primaires de niveaux d'eau.

8.2.1 Estimation primaire de niveaux d'eau par croisement entre les segments informatifs et un MNT à haute résolution spatiale

Le croisement des segments informatifs dilatés avec le MNT a permis d'obtenir des estimations ponctuelles de niveaux d'eau selon des intervalles $IN^i = [N_{\min}^i, N_{\max}^i]$ (Figure 8.8, p. 154). Pour caractériser l'incertitude sur ces estimations des niveaux d'eau, la moyenne des tailles des intervalles d'estimation a été calculée sur l'ensemble des segments informatifs (Figure 8.7 A, p. 153). La demi-incertitude ainsi obtenue sur les estimations primaires de niveaux d'eau est de 65 cm.

8.2.2 Construction d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs

Pour définir une hiérarchie des segment informatifs, nous considérerons dans la suite que l'écoulement est bidimensionnel. En conséquence, la définition du schéma de circulation des eaux dans la plaine a

été déterminé grâce à une phase d'expertise hydraulique, suivant les critères proposés au paragraphe 5.2 (Figure 8.6).

Pour rappel, la construction de la hiérarchie hydraulique passe par plusieurs étapes :

- définition d'unités hydrauliques, au sein desquelles l'écoulement est supposé globalement et majoritairement monodimensionnel,
- détermination des lignes d'écoulement préférentiel à l'intérieur de ces unités grâce aux courbes de niveaux,
- définition des relations d'ordre amont-aval entre unités hydrauliques grâce aux lignes d'écoulement préférentiel,
- application aux segments informatifs du schéma de circulation des eaux défini par les unités hydrauliques, les lignes d'écoulement préférentiel et les relations d'ordre amont-aval entre unités hydrauliques.

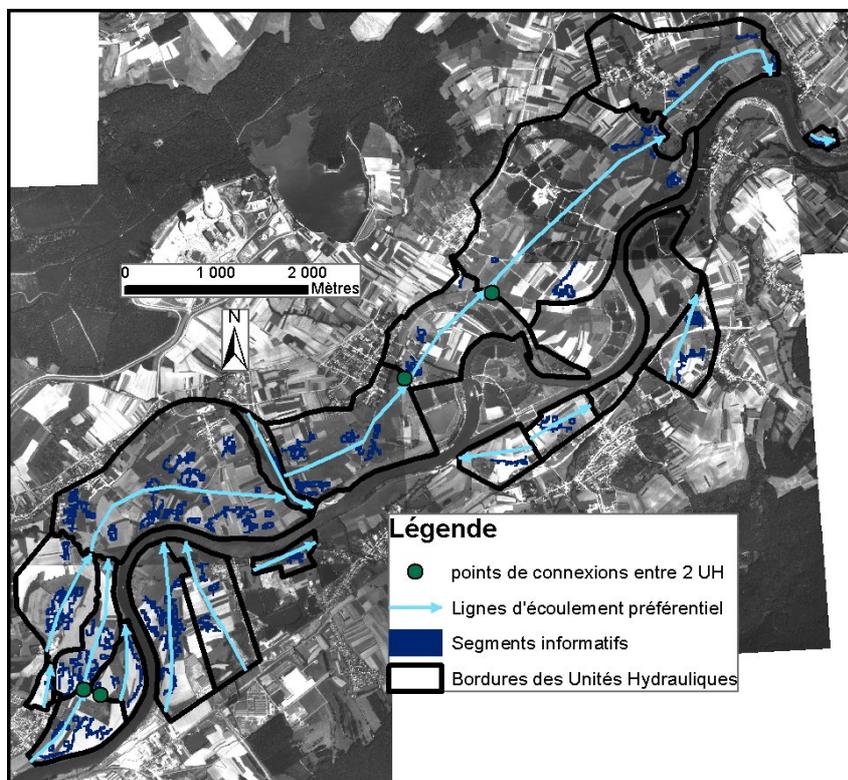


Figure 8.6 : Schéma de circulation des eaux

Par ailleurs, conformément à la méthode proposée au paragraphe 5.2.2.4, les segments informatifs ont été découpés de manière à ce qu'ils soient les plus petits possibles tout en restant représentatifs vis à vis de l'image radar. Pour cela nous avons choisi d'effectuer le découpage pour que leur dimension le long de l'écoulement soit au moins égale au double de la RSE, augmentée de l'incertitude associée à la précision du géoréférencement de l'image radar ce qui correspond numériquement à $2(RSE+PG)=80$ m. A l'issue du découpage, les segments informatifs sont au nombre de 231. La hiérarchie hydraulique des segments informatifs exploitée dans la suite est celle des segments découpés.

8.2.3 Réduction des incertitudes d'estimation des niveaux d'eau par mise en cohérence hydraulique

Après définition de la hiérarchie hydraulique des segments informatifs découpés (Cf. §5.2.2.4), l'algorithme de mise en cohérence hydraulique a été appliqué, ce qui a permis d'obtenir des estimations finales de niveaux d'eau (Figure 8.7 B et Figure 8.8 B), sous la forme d'un intervalle par segment informatif découpé.

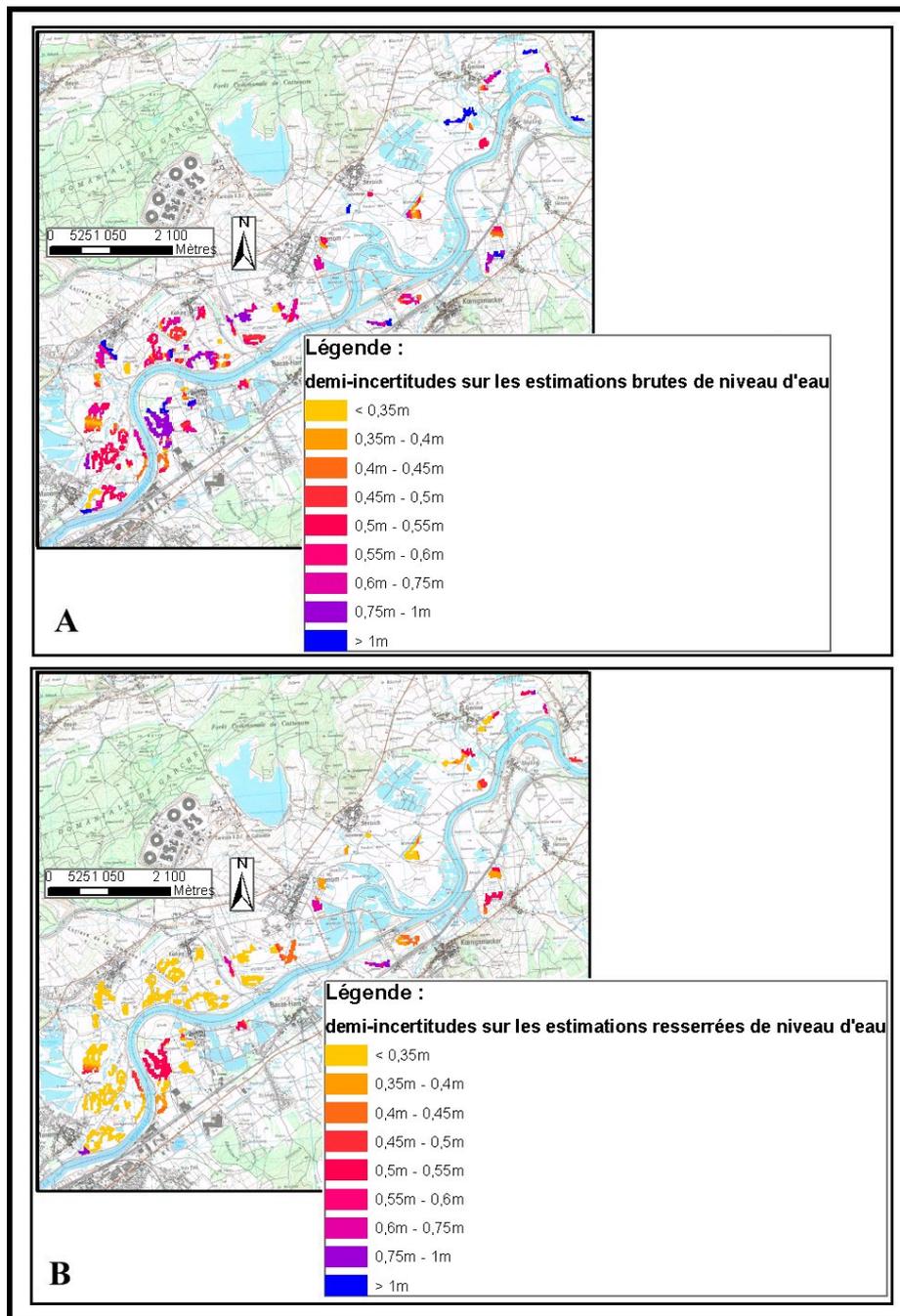


Figure 8.7 A et B : Incertitudes sur les estimations brutes (A) et resserrées (B) de niveaux d'eau pour chaque segment informatif.

Pour rappel, les estimations primaires de niveaux d'eau ont été obtenues sous la forme d'intervalles encadrés par un majorant et un minorant. L'algorithme de mise en cohérence hydraulique impose d'une part une décroissance des majorants de l'amont vers l'aval et d'autre part une croissance des minorants de l'aval vers l'amont. La propagation des contraintes de décroissance entre des niveaux d'eau affectés d'une relation d'ordre en suivant la logique de l'écoulement définie par la hiérarchie hydraulique des segments informatifs permet alors d'obtenir des estimations finales de niveaux d'eau resserrées, cohérentes d'un point de vue hydraulique (Figure 8.8 B).

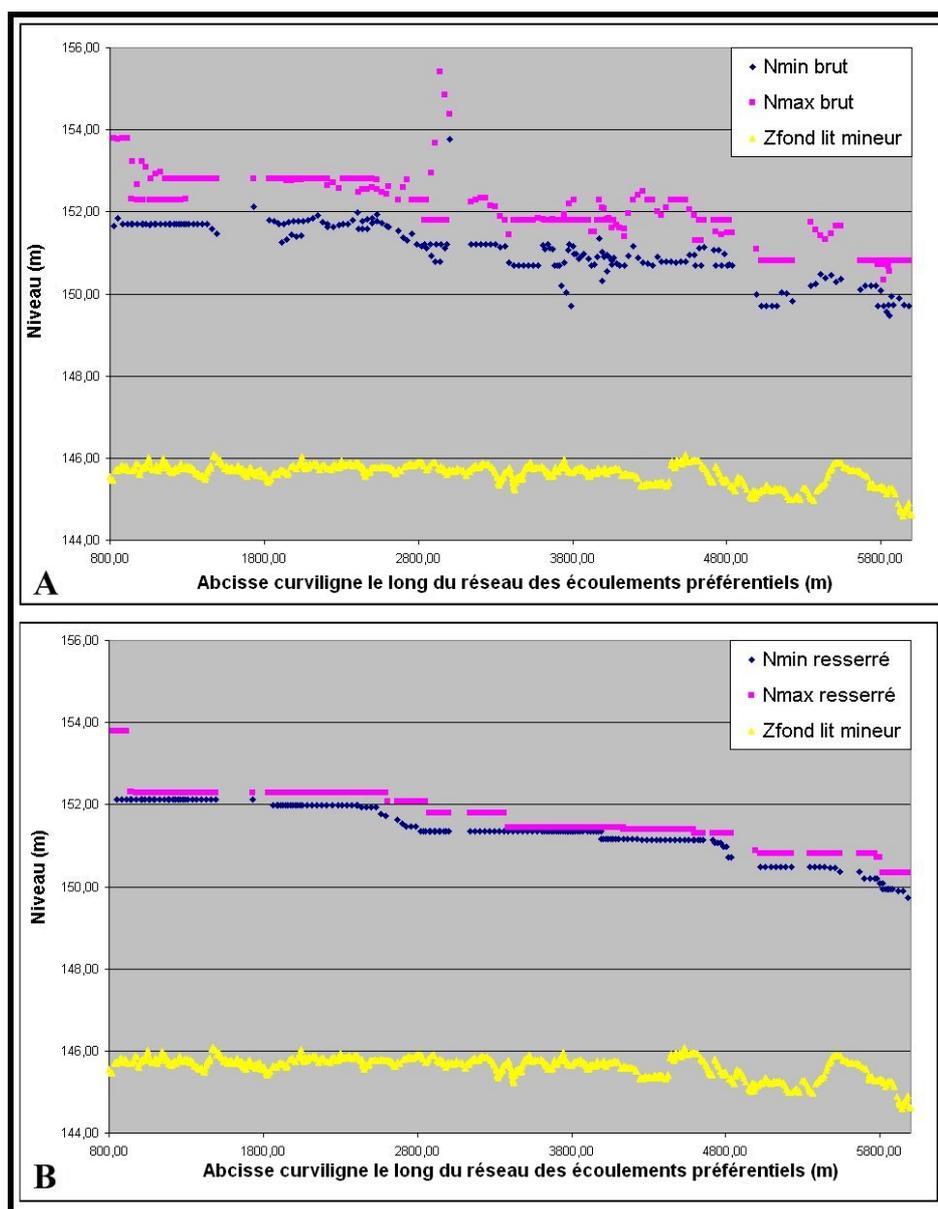


Figure 8.8 A et B : Exemple d'estimations des niveaux d'eau (intervalles [Max, Min]). Les triangles jaunes représentent la cote fond du lit mineur de la Moselle estimée à partir du MNT et projetée le long des lignes d'écoulement préférentiel.

A : Estimations brutes obtenues par croisement des segments informatifs avec le MNT

B : Estimations resserrées par l'algorithme de mise en cohérence hydraulique

A partir de la valeur centrale de chacun des intervalles d'estimation - $(N_{\min}+N_{\max})/2$ -, il est possible d'estimer des « demi-intervalles » et d'en déduire une taille moyenne de ces demi-intervalles sur l'ensemble des estimation de niveaux d'eau. Étant donné que le niveaux d'eau réel est supposé être inclus au sein de chaque intervalle d'estimation, cette taille est un indicateur de l'incertitude sur l'estimation des niveaux d'eau. Nous la nommerons par la suite « demi-incertitude moyenne ». Si on retient la moyenne des intervalles comme estimateur du niveau d'eau, la précision de cet estimateur sera au pire égale à la demi incertitude moyenne. Dans le cas de la Moselle, la demi-incertitude moyenne obtenue est de 38 cm. Pour plus de clarté, sur la Figure 8.8 la présentation des niveaux d'eau est restreinte à une partie de ceux-ci. Les niveaux d'eau présentés sont associés à un « chemin hydraulique préférentiel », c'est à dire une suite de lignes d'écoulement préférentiel interconnectées (Cf. § 5.3.4). Rappelons enfin que la demi-incertitude est un majorant de l'erreur moyenne sur les estimations de niveaux d'eau. En effet, comme on le verra par la suite pour le site d'étude de l'Alzette, la valeur de l'erreur est beaucoup plus faible, de l'ordre de 13 cm.

8.2.4 Conclusion

L'application de la méthodologie d'estimation des niveaux d'eau au site d'étude de la Moselle, a permis d'obtenir une demi-incertitude d'estimation des niveaux d'eau de 38cm. Cette demi-incertitude a pu être obtenue grâce à la mise en cohérence hydraulique. Par ailleurs, il semble important de noter que les segments informatifs qui ont été les plus contraignants dans la mise en cohérence hydraulique ne représente que 50% de la totalité des segments informatifs. En conséquence, étant donné que les segments informatifs couvrent 1% de la carte d'inondation initiale, il en découle que seulement 0,5% de l'information initiale (en nombre de pixels) fournie par le radar est utile pour l'estimation des niveaux d'eau. Cela montre tout l'intérêt du travail d'épuration et de traitement de l'image radar qui a été effectué pour estimer des niveaux d'eau de façon précise.

Par ailleurs, la demi-incertitude de 38 cm pour l'image RADARSAT est à rapprocher des demi-incertitudes de 20 cm obtenues par le même type d'approche (Raclot, 2003a) à partir de photographies aériennes au 18000^{ème} sur un tronçon de la Moselle à une dizaine de kilomètres en amont du site d'étude. L'écart obtenu entre les deux types de supports existe mais semble acceptable vis à vis des précisions requises pour la modélisation hydraulique. Par ailleurs, si on compare les résultats avec ceux d'autres travaux sur des images satellitaires radar, on constate que la demi-incertitude moyenne obtenue pour la Moselle est plus faible. Par exemple, (Brakenridge et al., 1998) ont obtenus des incertitudes d'estimation de niveau d'eau de 1 à 3 m avec une image ERS (Cf.§3.2.3.2), ce qui est beaucoup plus important que celles obtenus dans la thèse pour la Moselle.

8.3 Intégration des caractéristiques spatiales extraites d'images satellitaires dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique

La troisième partie de l'application de la méthode concerne l'intégration des caractéristiques spatiales de l'inondation issues de l'image satellitaire dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique.

Elle présente les travaux de modélisation hydraulique effectués pour le site d'étude de la Moselle et le calage grâce à des simulations Monte-Carlo.

8.3.1 Mise en place d'un modèle hydraulique sur le site de la Moselle

Le modèle hydraulique développé pour le site de la Moselle est basé sur le code de calcul Hec-RAS, qui fonctionne avec un schéma de calcul implicite aux différences finies à quatre points et un schéma d'écoulement hydraulique 1D-casier (USACE, 2005a).

8.3.1.1 Les équations du modèle.

Le code Hec-RAS résout les équations de Barré de St Venant 1D pour l'écoulement principal en l'absence de singularité hydraulique (USACE, 2005b). Pour modéliser les écoulements au droit des singularités hydrauliques, il utilise des lois d'ouvrage qui lient hauteur et débit par un coefficient de débit. Les lois d'ouvrages implémentées dans le code HEC RAS sont décrites en détail dans le manuel de référence d'hydraulique de ce code (USACE, 2005a).

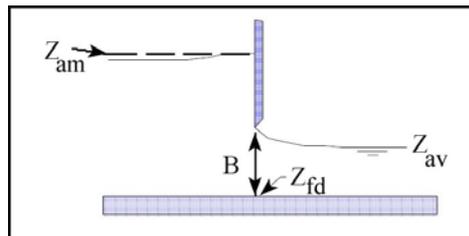


Figure 8.9 : Schéma simplifié d'une vanne (adapté de (USACE, 2005a)).

Dans le modèle développé pour la Moselle, les lois d'ouvrages utilisées sont des lois de vannes et de déversoir. Leurs équations sont décrites par les relations (8.1) à (8.3).

1) Loi de vanne :

Vannes partiellement ouvertes en contact avec l'eau, dénoyée à l'aval :

$$\text{Si } \frac{(Z_{am} - Z_{fd})}{(Z_{av} - Z_{fd})} < 0,65, Q = C_{\text{vanne}_1} \cdot L \cdot B \cdot \sqrt{2g(Z_{am} - Z_{fd})} \quad (8.1)$$

Vanne partiellement ouverte, noyée à l'aval :

$$\text{Si } \frac{(Z_{am} - Z_{fd})}{(Z_{av} - Z_{fd})} \geq 0,65, Q = C_{\text{vanne}_2} \left\{ C_{\text{vanne}_1}, \frac{(Z_{am} - Z_{fd})}{(Z_{av} - Z_{fd})} \right\} \cdot L \cdot B \cdot \sqrt{2g(Z_{am} - Z_{av})} \quad (8.2)$$

2) Loi de déversoir (valable aussi dans le cas de vannes totalement ouvertes sans contact avec l'eau, cas équivalent à l'absence de vanne) :

$$Q = C_{\text{déversoir}} \cdot L \cdot (Z_{am} - Z_{av}) \quad (8.3)$$

Les notations des relations (8.1) à (8.3) sont expliquées dans le Tableau 8.1.

Notation	Signification
Q	débit
Z_{am}	niveaux d'eau à l'amont de la vanne
Z_{av}	niveaux d'eau à l'aval de la vanne
Z_{fd}	altitude du fond (du déversoir) en dessous de la vanne
L	largeur du fond en dessous de la vanne
C_{vanne_1}	coefficient de vanne en dénoyé, constant
C_{vanne_2}	coefficient de vanne en noyé, fonction de coefficient de vanne en dénoyé C_{vanne_1} et du rapport entre la charge hydraulique amont et la charge hydraulique aval $\left(\frac{(Z_{am} - Z_{fd})}{(Z_{av} - Z_{fd})} \right)$: fonction directement implémentée dans le logiciel
$C_{déversoir}$	coefficient de déversoir, constant

Tableau 8.1 : Variables et paramètres des lois de vanne et de déversoir implémentées sous HEC-RAS.

NB : dans les équations (8.1) à (8.3), seuls les coefficients de débit doivent être définis, les autres paramètres étant imposés par la géométrie des ouvrages.

8.3.1.2 Définition de la géométrie du modèle

La géométrie du modèle sous HEC-RAS a été construite sous forme de profils en travers, de casiers hydrauliques, de structures latérales à l'intersection des casiers avec l'écoulement principal et d'ouvrages hydrauliques.

Le site d'étude de la Moselle est équipé de deux groupes barrage-écluse et de cinq ponts (Cf. §7.1) qui ont été pris en compte dans le modèle hydraulique. De plus, les zones dans lesquelles l'écoulement n'est pas parallèle à l'écoulement principal de la rivière ont fait l'objet de la construction de casiers hydrauliques.

Les écluses, barrages et vannes

Le débit qui traverse les écluses hors période de crue est négligeable (information SNNE¹⁶). De plus, en période de crue, les écluses sont fermées. En conséquence, de façon générale, le débit transitant par les écluses peut être négligé par rapport au débit en lit mineur et majeur de la Moselle. C'est pourquoi, les écluses ont été représentées par des murs dans le modèle hydraulique.

L'ouverture des vannes des barrages est régulée à l'aide du niveau d'eau amont des barrages (Cf. Annexe 2) et a été implémentée comme telle dans le modèle : le code HEC-RAS calcule l'ouverture des vannes de façon à respecter une consigne de niveau d'eau amont. Les barrages et les vannes associées ont été définis dans la géométrie du modèle suivant les plans présentés en Annexe 2 (Figure A 2.1, Figure A 2.2, Figure A 2.3 et Figure A 2.4).

¹⁶ SNNE est l'acronyme de « Services de la Navigation du Nord EST ».

En crue, les vannes sont totalement ouvertes, de manière à rendre les barrages « transparents » (Cf. Annexe 2). Nous avons supposé dans ce cas, que les vannes ne sont pas en contact avec l'eau, ce qui permet d'utiliser la loi de déversoir (8.3).

Dans la thèse, l'objectif est de caler le modèle pour une modélisation en période de crue, durant laquelle les lois de vanne (8.1) et (8.2) sont peu utilisées. En conséquence, les paramètres associés à ces équations ont peu d'influence sur les résultats du modèle en période de crue. C'est pourquoi, les coefficients de débit des vannes n'ont pas été intégrés dans la procédure de calage. Leurs valeurs ont été prises égales aux valeurs par défaut proposées par le manuel de l'utilisateur d'Hec-RAS (USACE, 2005b) : $C_{\text{vanne}}=0,7$.

Les ponts

La géométrie précise des ponts étant inconnue, il a été choisi de les intégrer dans le modèle sous forme de profils en travers avec un coefficient de frottement en lit mineur propre (différent du Manning en lit mineur pour le reste des profils en travers). Pour éviter un accroissement trop important du nombre de paramètres, une valeur unique du coefficient de frottement est appliquée à l'ensemble des ponts.

Les casiers hydrauliques

Lors de la construction de la hiérarchie hydraulique des segments informatifs (Cf. §8.2.2), des lignes d'écoulement préférentiel ont été définies au sein des unités hydrauliques. Lorsque les lignes d'écoulement préférentiel au sein d'une unité hydraulique de surface importante ne coïncident pas avec la direction et le sens d'écoulement en lit mineur, un casier hydraulique est introduit dans la géométrie du modèle, les limites des casiers correspondants à celles des unités hydrauliques concernées. Dans le modèle hydraulique de la Moselle, quatre casiers hydrauliques ont été construits. Les écoulements entre casiers hydrauliques et écoulement principal sont modélisées par des lois de déversoir (8.3) sur des structures latérales (limites des casiers). De la même façon que pour les ponts, le coefficient de débit est imposé identique pour l'ensemble des structures latérales afin de limiter le nombre de degrés de liberté du modèle.

La Figure 8.10 présente la géométrie du modèle, vue en plan, sur l'ensemble de la zone d'étude. L'extraction des altitudes du sol sur les différents éléments (sauf les barrages) constituant la géométrie du modèle hydraulique a été effectuée par croisement sous SIG, avec le modèle numérique de terrain au format TIN.

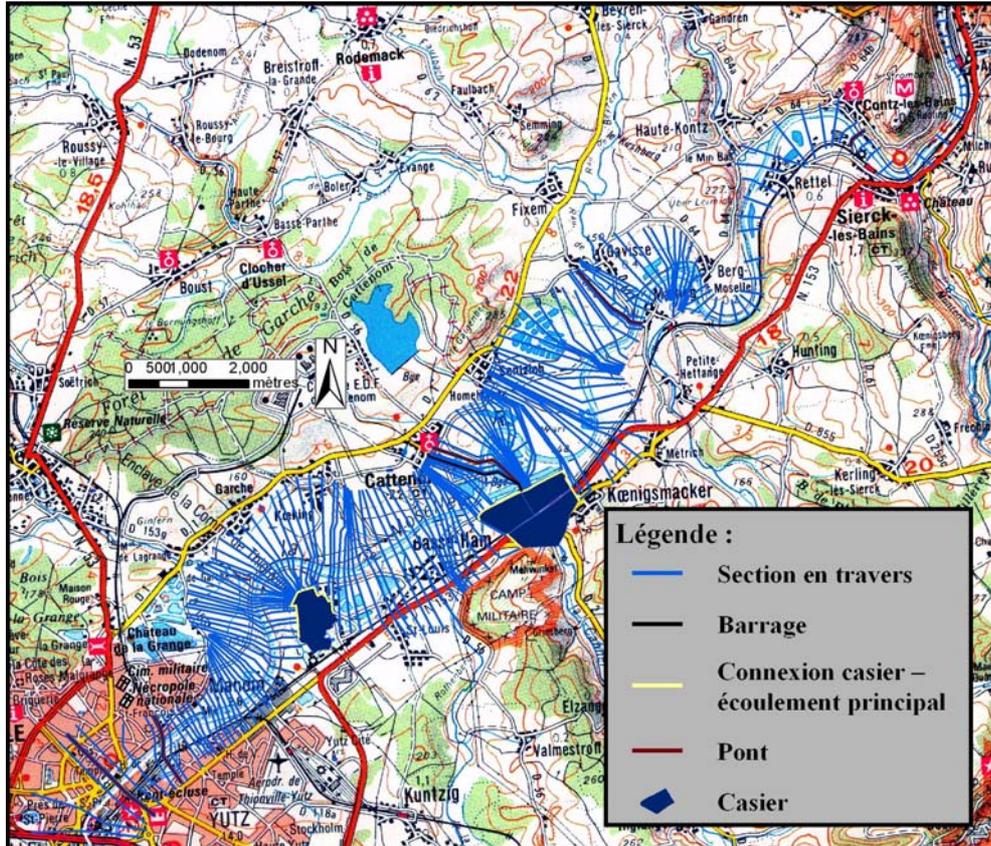


Figure 8.10 : Vue en plan de la géométrie du modèle hydraulique mis en place sur le site d'étude de la Moselle

Conditions initiales, conditions aux limites et durée de simulation.

La condition aux limites amont appliquée au modèle est l'hydrogramme observé à la station hydrométrique d'Uckange (donnée SNNE).

La condition aval est une courbe de tarage reconstruite à partir des mesures de niveaux et des estimations de débits fournies par les services hydrométriques allemands. Comme il a été annoncé au paragraphe 1.3.1, les courbes de tarages sont entachées d'incertitudes et d'imperfections. Pour permettre une compensation éventuelle des erreurs sur la courbe de tarage aval, nous avons choisi de d'introduire une valeur du coefficient de Manning propre aux cinq sections en travers aval du modèle.

La condition initiale est calculée par le logiciel à partir d'un débit amont et d'une simulation en régime permanent.

Les simulations ont été effectuées pour une durée de 6,5 jours, entre le 25 février 1997 à 00h00 (début de la montée des eaux) et le 3 mars 1997 à 12h (phase finale de la décrue).

8.3.2 Mise en place des simulations Monte-Carlo

8.3.2.1 Les paramètres du modèle

De façon générale, en plaine d'inondation, les frottements en lit mineur sont plus faibles qu'en lit majeur en particulier à cause d'une rugosité de surface plus faible. En conséquence, il a été choisi d'affecter des coefficients de Manning différents en lit mineur et majeur, le Manning en lit majeur étant nécessairement plus élevé qu'en lit mineur.

D'autre part, pour permettre la prise en compte de freinages à l'écoulement plus importants en zone urbaine que dans le reste du lit majeur, il a été choisi d'affecter un coefficient de Manning différent pour les zones urbaines (supérieur à celui du reste du lit majeur). La carte des zones urbaines a été réalisée par photo-interprétation sur les photographies aériennes hors crue au 25000^{ème} de la Moselle.

Les autres paramètres du modèle ont été évoqués au paragraphe 8.3.1.2.

Le Tableau 8.2 récapitule les différents paramètres implémentés dans le générateur de paramètres et les intervalles de valeurs choisies physiquement acceptables – inspirés des manuels de l'utilisateur (USACE, 2005b), de référence hydraulique (USACE, 2005a) et du Manning (USGS[®]) d'HEC-RAS – et les relations d'inégalité imposées.

Paramètre	Notation	Intervalles de variation des paramètres		Relations entre paramètres
		Min	Max	
Coefficient de Manning du lit mineur	$n_{\text{rivière}}$	0,02	0,08	
Coefficient de Manning du lit majeur (Hors zones urbaines)	n_{plaine}	0,02	0,2	$n_{\text{plaine}} > n_{\text{rivière}}$
Coefficient de Manning des zones urbaines	n_{urb}	0,02	0,2	$n_{\text{urb}} > n_{\text{plaine}}$
Coefficient de Manning du lit mineur pour les 5 sections aval	n_{aval}	0,02	0,08	
Coefficient de Manning pour les ponts	n_{pont}	0,02	0,2	$n_{\text{pont}} > n_{\text{rivière}}$
Coefficient de débit des barrages	C_{bar}	2,6	4	
Coefficient de débit des structures latérales	C_{sl}	2,6	4	

Tableau 8.2 : Paramètres de calage et intervalles de valeurs physiquement acceptables implémentés dans le générateur de paramètres.

Dans la mise en application de la méthode GLUE, 28000 jeux des paramètres ont été générés et ont permis d'obtenir 28000 résultats de simulation.

Les paragraphes suivants visent à montrer le gain offert par l'introduction des caractéristiques spatiales extraites de l'image radar dans une procédure de calage. Pour cela, un premier calage va être réalisé de façon traditionnelle à partir des hydrogrammes observés. Ce premier calage sera ensuite poursuivi par l'introduction soit de l'étendue inondée certaine, soit des niveaux d'eau extraits de

l'image satellitaire radar dans la procédure de calage. En conséquence, la présentation de l'évaluation des simulations Monte-Carlo est structurée en trois étapes :

- Calage préalable grâce aux hydrogrammes mesurés (approche conventionnelle),
- intégration des observations satellites d'étendues inondées dans la procédure de calage,
- intégration des estimations des niveaux d'eau satellites dans la procédure de calage.

8.3.2.2 Calage préalable grâce aux hydrogrammes mesurés

Évaluation des simulations Monte-Carlo grâce aux hydrogrammes observés

L'analyse des hydrogrammes amont et aval de la zone d'étude (Figure 7.4, p.131) montre une incohérence en terme de volume écoulé au cours de la crue de février 1997. Le calcul de l'intégrale des hydrogrammes amont et aval sur la durée de simulation permet d'estimer les volumes écoulés et montre une différence de 10% entre l'amont et l'aval ($V_{\text{aval}}=1,1*V_{\text{amont}}$). Or, d'après des informations collectées auprès de la SNNE, les apports latéraux des principaux ruisseaux de la zone d'étude sont négligeables tant en période de crue qu'en période de basses eaux. De plus, d'après des informations collectées auprès de la DIREN Lorraine, des débits de temps de retour plus importants que celui de la crue de 1997 ont été jaugés par le passé à la station d'Uckange. Par contre, à l'aval (Perl), l'information des débits jaugés n'a pu être obtenue. En conséquence, nous avons supposé les estimations de débit à l'amont plus fiables qu'à l'aval. Cette hypothèse est en partie corroborée par la cohérence entre les hydrogrammes à Uckange et à la prise d'eau de la centrale de Cattenom (Cf. Figure 7.4, p.131).

Pour éviter un biais important dû à l'incohérence entre hydrogrammes amont et aval dans la procédure de calage, nous avons choisi d'utiliser un critère de performance qui permette de considérer acceptable un débit simulé présentant un écart au débit observé inférieur à 10%. Ce critère sera par la suite nommé Nash modifiée :

$$\text{NASH}_{\text{modifié}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\text{perf}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{\text{obs}}(t) - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}, \text{ avec} \quad (8.4)$$

$$\text{perf}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } \{Q_{\text{sim}}(t) \geq 0.9 * Q_{\text{obs}}(t) \text{ et } Q_{\text{sim}}(t) \leq 1.1 * Q_{\text{obs}}(t)\} \\ Q_{\text{sim}}(t) - Q_{\text{obs}}(t) & \text{sin on} \end{cases}$$

Les résultats d'évaluation des simulations Monte-Carlo à partir des critères de NASH sont présentés dans la Figure 8.11 pour le coefficient de Manning en lit Mineur.

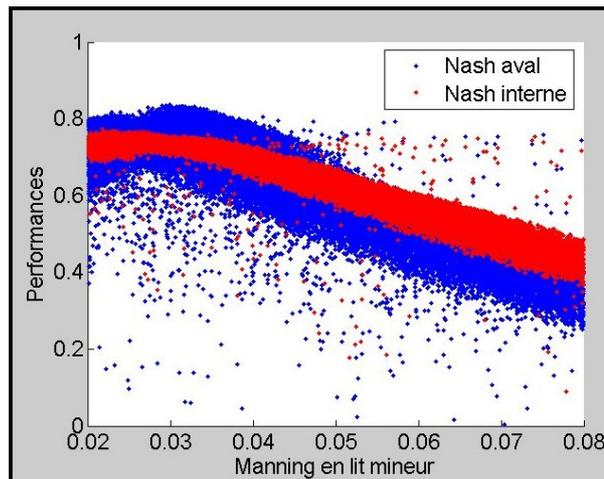


Figure 8.11 : Critères de Nash obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo pour le Manning en lit Mineur (un point de chaque couleur par simulation, une couleur par critère, les Nash amont et aval correspondant respectivement au critères de Nash calculés à partir des hydrogrammes à la prise d'eau de la centrale de Cattenom et à la station hydrométrique d'Uckange).

Sur cette figure, un point fournit la valeur du critère de Nash (une couleur par critère de Nash), d'un résultat de simulation (pour une réalisation dans l'espace des paramètres). En abscisse sont représentées les valeurs du coefficient de Manning en lit mineur et en ordonné les valeurs des critères de Nash associés. Une performance (Nash) forte pour un jeu de paramètres signifie que les résultats du modèle simulés à partir de ce jeu de paramètres sont proches des données observées sur laquelle la performance est calculée. Par exemple, une valeur forte du Nash modifié aval correspond à une bonne reproduction du débit aval.

En conséquence, un critère de performance est discriminant pour la détermination des paramètres acceptables s'il est possible d'observer une tendance marquée sur l'évolution de ce critère par rapport aux valeurs du paramètre considéré (Manning en lit mineur dans la Figure 8.11). Dans le cas contraire, il est possible de trouver des valeurs de performance identiques pour l'ensemble des valeurs du paramètre considéré, ce qui peut avoir deux origines :

- Le modèle est peu sensible aux variations du paramètre considéré (par exemple sur-paramétrisation du modèle).
- Le paramètre considéré a peu d'influence sur le critère d'évaluation (données de calage en nombre insuffisant, ou critère d'évaluation peu pertinent).

A l'issue de l'évaluation des simulations Monte Carlo, les critères de Nash apparaissent discriminants uniquement pour le Manning en lit mineur. C'est pourquoi l'évaluation suivant les critères de NASH n'est présentée que pour le coefficient de Manning en lit mineur (Figure 8.11). Les graphiques représentant les critères de Nash pour les autres paramètres sont présentés en Annexe 4 (Figure A 4.1).

Pour pouvoir discriminer les jeux de paramètres acceptables, il est nécessaire de définir des seuils d'acceptabilité sur les critères de Nash.

Détermination de seuils d'acceptabilité des critères de Nash

La détermination des seuils d'acceptabilité des critères de performance est une phase délicate de la méthode GLUE. De façon générale, pour déterminer ces valeurs nous avons appréhendé des

estimations qu'il serait possible d'obtenir sans utilisation d'un modèle hydraulique. L'idée sous-jacente à cette approche est de considérer acceptables les modèles qui fournissent des informations plus pertinentes qu'en l'absence de modélisation hydraulique.

Nous avons considéré le cas où seuls la vitesse de déplacement du pic de crue dans la plaine et l'hydrogramme amont seraient connus. Il est possible d'estimer des hydrogrammes pour les profils en travers du modèle par décalage dans le temps de l'hydrogramme amont, déterminé grâce au quotient de la distance du profil en travers considéré par rapport à l'amont par la vitesse de déplacement du pic de crue. L'hydrogramme ainsi estimé permet en particulier de calculer un critère de Nash pour les sections en travers sur lesquelles un hydrogramme observé est disponible (prise d'eau de la centrale et section aval dans le cas de la Moselle).

Ces calculs de Nash ont permis d'obtenir, dans le cas de la Moselle les seuils d'acceptabilité suivants : $\text{Seuil}_{\text{nash interne}}=0,75$; $\text{Seuil}_{\text{nash modifié aval}}=0,72$.

L'application des seuils d'acceptabilité sur les critères de Nash interne et Nash modifié aval fournissent les intervalles de valeurs de paramètres acceptables présenté dans le Tableau 8.3.

Paramètres	Notation	Intervalles de valeurs acceptables au regard des critères de NASH		Correspondance en coefficient de frottement de Strickler	
		Min	Max	Max	Min
Coefficient de Manning du lit mineur	$n_{\text{rivière}}$	0,021	0,054	48	19
Coefficient de Manning du lit majeur (Hors zones urbaines)	n_{plaine}	0,024	0,188	42	5
Coefficient de Manning des zones urbaines	n_{urb}	0,032	0,2	31	5
Coefficient de Manning du lit mineur pour les 5 sections aval	n_{aval}	0,02	0,098	50	10
Coefficient de Manning pour les ponts	n_{pont}	0,024	0,2	42	5
Coefficient de débit des barrages	C_{bar}	2,6	4		
Coefficient de débit des structures latérales	C_{sl}	2,6	4		

Tableau 8.3 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres vis à vis des hydrogrammes interne et aval.

Dans le Tableau 8.3, on constate que les critères de Nash sont discriminants principalement pour le coefficient de frottement du lit mineur. Le pouvoir de discrimination des critères de NASH est cependant réduit. En effet, les valeurs acceptables obtenues pour le coefficient de frottement en lit mineur peuvent a priori correspondre tant à des petits cours d'eau de montagne – pentes fortes et fonds très irréguliers- qu'à de très gros cours d'eau - très faibles pentes et fonds lisses (Cf. résultats des études de Pradé, fournis en Annexe 5, Tableau A 5.1.

En conséquence, des valeurs très différentes du coefficient de Manning en lit mineur permettent d'obtenir des modèles acceptables vis à vis des hydrogrammes mesurés. Cette constatation montre l'ampleur du phénomène d'équifinalité lors du calage du modèle hydraulique à partir des seuls hydrogrammes.

8.3.2.3 *Intégration d'une carte des étendues inondées dans la procédure de calage*

Connaissant l'étendue inondée à un instant donné grâce à une image satellitaire radar, nous proposons d'intégrer celle-ci dans la procédure de calage afin mieux contraindre du modèle. En effet, les valeurs de paramètres jugées acceptables au regard des hydrogrammes observés, ne le sont pas nécessairement vis à vis des étendues inondées. La Figure 8.12 présente la carte d'inondation certaine extraite de l'image radar, en comparaison avec deux étendues inondées simulées par le modèle hydraulique avec deux jeux de paramètres acceptables vis à vis des hydrogrammes observés. Sur cette figure, les zones au sein desquelles l'information fournie par le radar est incertaine ont été masquées (zones noires). On constate qu'avec une valeur de Manning en lit mineur de 0,021, bien que le modèle simule correctement les débits, il sous-estime fortement l'étendue inondée dans la partie amont de la zone d'étude. L'intégration de l'étendue inondée observée sur l'image va en conséquence permettre de rejeter certaines valeurs de paramètres.

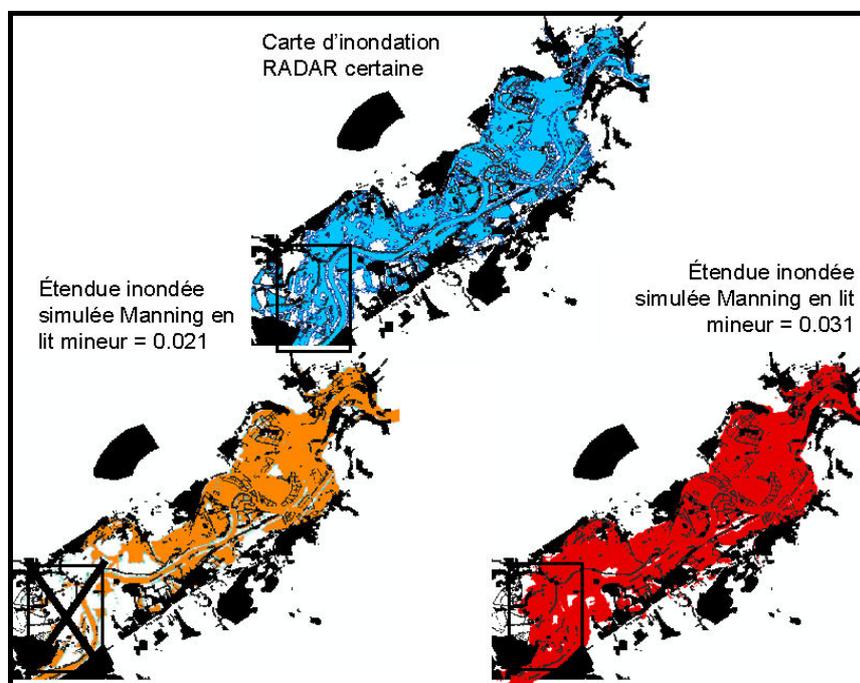


Figure 8.12 : Illustration de l'intérêt d'intégrer les étendues inondées dans la procédure de calage.

En haut : carte d'inondation certaine (zones incertaines en noir)

En bas à gauche : l'étendue inondée simulée avec un Manning en lit mineur de 0,021 (valeur acceptable/débits) est sous estimée.

En bas à droite : l'étendue inondée simulée avec un Manning en lit mineur de 0,031 (autre valeur acceptable/débits) semble correcte.

Nous allons dans la suite exploiter la méthode d'intégration des étendues inondées observée proposée à la section 6.4.2.

Évaluation des simulations Monte-Carlo grâce à la carte d'inondation certaine

La méthode d'évaluation de la capacité du modèle hydraulique à reproduire les étendues inondées observées (image satellitaire) proposée au paragraphe 6.4.2 a été appliquée sur le site de la Moselle. Cette évaluation nécessite d'une part un croisement de la carte d'inondation certaine avec la géométrie du modèle et d'autre part le calcul des emprises d'inondation simulées à la date d'acquisition de l'image satellitaire à partir des niveaux d'eau simulés.

Les résultats de l'évaluation des simulations Monte-Carlo grâce aux critères d'évaluation de Nash, $Diff_{\text{erreur}}$ - relation (6.2) – et $Perf_{\text{étendue_inondée}}$ - relation (6.3) - sont présentés dans la Figure 8.13 pour le coefficient de Manning en lit mineur. Les évaluations pour les autres paramètres du modèle sont présentées en Annexe 4 (Figure A 4.3) car aucune tendance n'est visible sur les graphiques correspondants.

Sur la Figure 8.13, un point représente l'évaluation, suivant un critère donné (une couleur pour chaque critère), d'une simulation pour un jeu de paramètre (en ordonnée : valeurs des critères de performance ; en abscisse : valeurs du paramètre considéré, ici le Manning en lit mineur). Sur cette figure, on constate que les meilleures valeurs du critère $Perf_{\text{étendue_inondée}}$ sont équivalentes (de l'ordre de 0.45) pour des valeurs de Manning comprises entre 0.025 et 0.045. Cela est dû au fait que le modèle ne parvient pas à simuler exactement (par rapport à la carte d'inondation) les emprises transversales observées de l'inondation sur plus de 45 % des profils en travers.

Cette constatation montre l'intérêt d'intégrer un critère de performance qui tient compte des différences entre observé et simulé de façon moins restrictive : nous considérons un jeu de paramètre acceptable s'il permet d'obtenir des étendues inondées simulées similaires à celles observées, sans qu'elles soient exactes sur chaque profil en travers.

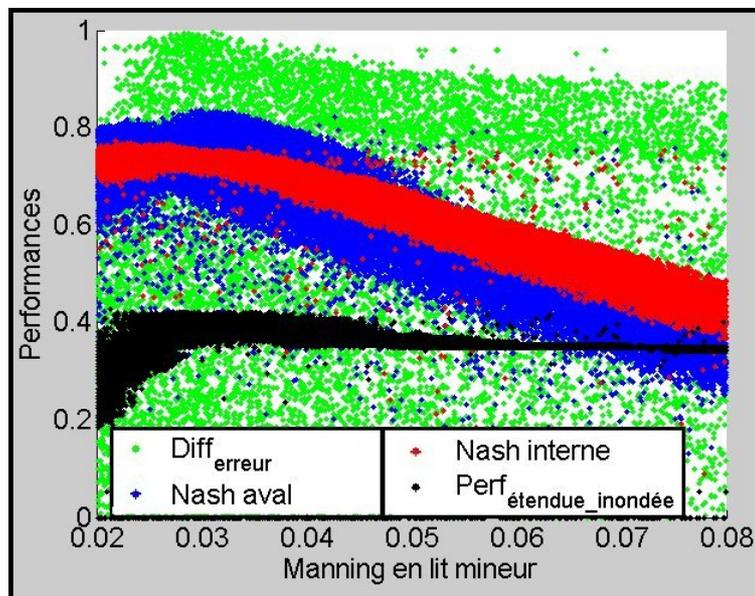


Figure 8.13 : Critères de performance de Nash, $Diff_{\text{erreur}}$, et $Perf_{\text{étendue_inondée}}$ obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo pour le Manning en lit Mineur (un point de chaque couleur par simulation, une couleur par critère).

Détermination de seuils d'acceptabilité des critères d'évaluation sur les étendues inondées

De la même façon que pour les Nash, la recherche de seuils d'acceptabilité sur les critères de surface est basée sur l'examen du résultat qu'il serait possible d'obtenir en l'absence de modèle hydraulique.

Pour cela, le cas abordé est celui où seules sont connues des mesures de niveaux d'eau amont (Uckange) et aval (Perl) en lit mineur à la date d'acquisition de l'image satellitaire. A partir de ces deux mesures de niveaux, il est possible, par interpolation linéaire, de calculer un niveau d'eau sur chaque profil en travers du modèle. Par seuillage altimétrique sur les profils en travers 3D du modèle (à la valeur du niveau précédemment interpolé), il est possible d'obtenir une étendue inondée par profil en travers, permettant de calculer les seuils d'acceptabilité sur les critères d'évaluation $Diff_{\text{erreur}}$, et $Perf_{\text{étendue_inondée}}$. Avec cette approche, seuls les modèles qui apportent plus d'information qu'une interpolation linéaire entre niveaux d'eau mesurés à l'amont et l'aval sont considérés acceptables.

Cette approche fournit les seuils d'acceptabilité des critères de performance suivants : $Seuil_{Diff_erreur}=0,77$; $Seuil_{Perf_étendue_inondée}=0,34$.

L'application de ces seuils d'acceptabilité fournit des valeurs de paramètres acceptables dans des intervalles présentés dans le Tableau 8.4.

Paramètres	Notation	Intervalles de valeurs acceptables au regard des critères de NASH		Correspondance en coefficient de frottement de Strickler	
		Min	Max	Max	Min
Coefficient de Manning du lit mineur	$n_{\text{rivière}}$	0,023	0,031	44	32
Coefficient de Manning du lit majeur (Hors zones urbaines)	n_{plaine}	0,05	0,15	20	7
Coefficient de Manning des zones urbaines	n_{urb}	0,09	0,19	11	5
Coefficient de Manning du lit mineur pour les 5 sections aval	n_{aval}	0,02	0,1	50	10
Coefficient de Manning pour les ponts	n_{pont}	0,033	0,19	30	5
Coefficient de débit des barrages	C_{bar}	0,024	0,031		
Coefficient de débit des structures latérales	C_{sl}	0,05	0,15		

Tableau 8.4 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres vis à vis des hydrogrammes interne et aval et des surfaces inondées extraites de l'image radar.

Dans le Tableau 8.4, on peut constater que l'intégration des étendues inondées issues de l'image satellitaire permet de réduire de manière significative le phénomène d'équifinalité. En effet, les intervalles de paramètres acceptables sont plus restreints que dans le calage avec seulement les critères de Nash. Les valeurs acceptables du Manning en lit mineur correspondent, dans le tableau de M. Pradé (Tableau A 5.1, Annexe 5) à des rivières assez lisses à lisses (gravier et galets de diamètre inférieur à 8-10cm, sable) avec des pentes comprises entre 0,0008 et 0,00012, ce qui semble cohérent avec la morphologie du lit mineur de Moselle dans la zone d'étude.

Par ailleurs, il semble important de rappeler que c'est la combinaison des critères de performance basés sur les hydrogrammes et l'étendue inondée observées qui permet de parvenir aux intervalles de valeurs de paramètres acceptable proposés dans le Tableau 8.4. En effet, l'étendue inondée a été utilisée pour poursuivre un calage traditionnel à partir des hydrogrammes.

8.3.2.4 *Intégration des estimations des niveaux d'eau satellites dans la procédure de calage*

De la même façon que pour l'étendue inondée, connaissant une distribution spatiale des niveaux d'eau dans la plaine à un instant donné grâce à une image satellitaire radar, nous proposons d'intégrer celle-ci dans la procédure de calage afin mieux contraindre du modèle.

Évaluation des simulations Monte-Carlo grâce aux niveaux d'eau issus de l'image radar

L'estimation des niveaux d'eau satellitaires par profils en travers et casiers du modèle hydraulique (Cf. démarche proposée au paragraphe 6.4.3) a permis d'obtenir des estimations finales de niveaux d'eau avec une demi-incertitude de 40cm. Les estimations de niveau d'eau ainsi obtenues sont disponibles sur 50% des profils en travers et sur trois des quatre casiers hydrauliques du modèle, le dernier étant non inondé sur l'image radar.

Les résultats de l'évaluation des simulations Monte-Carlo grâce aux critères de performance $Appartenance_{niveau}$ - relation (6.4) - et $Dist_{niveau}$ - relation (6.5) - sont présentés dans la Figure 8.14 pour les coefficients de Manning en lit mineur et sur les sections en travers aval. Les évaluations pour les autres paramètres du modèle sont présentés en Annexe 4 (Figure A 4.3). Elles ne sont pas présentées dans cette partie du document car aucune tendance n'est visible sur celles-ci.

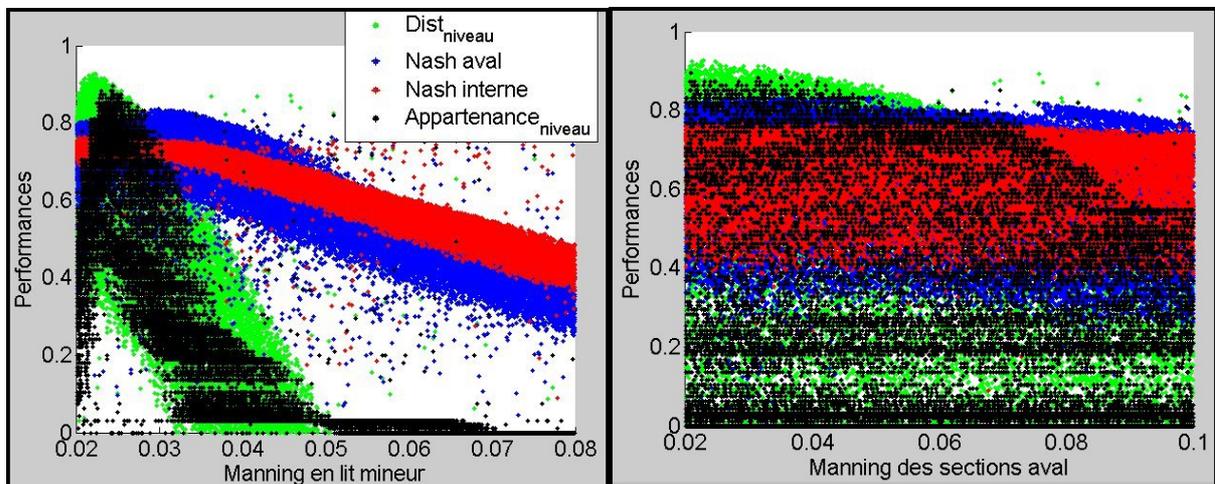


Figure 8.14 : Critères de Nash et fonction d'appartenance des niveaux d'eau obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo pour le Manning en lit Mineur (à gauche) et le Manning des sections aval (à droite).

Détermination de seuils d'acceptabilité des critères d'évaluation sur les estimations des niveaux d'eau

En théorie, étant donné que le niveau d'eau réel est supposé être inclus au sein des intervalles d'estimation satellitaire des niveaux d'eau, les seuils sur les critères de performance du modèle

devraient être pris égaux à 1. Cependant, aucun jeu de paramètre ne permet d'obtenir des performances du modèle égales à 1. Cela traduit probablement les limites de l'hypothèse d'écoulement monodimensionnel pour la Moselle, et les imperfections respectives de la modélisation et des estimations de niveaux d'eau. Néanmoins, sur la Figure 8.14, on constate que les performances maximales atteintes par le modèle pour la fonction coût $Appartenance_{niveau}$ sont supérieures à 0,9, ce qui semble tout à fait acceptable puisque cela signifie que le modèle parvient à reproduire les niveaux d'eau observés sur plus de 90% des profils en travers sur lesquels une observation est disponible.

Pour déterminer un seuil d'acceptabilité de la fonction d'appartenance des niveaux d'eau, nous avons considéré, comme pour les performances sur les étendues inondées, le cas où seules sont connues des mesures de niveau d'eau amont (Uckange) et aval (Perl) en lit mineur à la date d'acquisition de l'image satellitaire. Par interpolation linéaire sur les profils en travers, il est possible d'estimer un niveau d'eau sur chaque profil en travers du modèle (Cf. § 8.3.2.3). Le calcul des critères de performance sur ces niveaux interpolés fournit les seuils d'acceptabilité suivants : $Seuil_{Appartenance_niveau}=0,65$; $Seuil_{Distniveau}=0,86$.

L'application de ces seuils d'acceptabilité fournit des valeurs de paramètres acceptables dans des intervalles présentés dans le Tableau 8.5.

Paramètres	Notation	Intervalles de valeurs acceptables (NASH et fonctions d'appartenance)		Correspondance en coefficient de frottement de Strickler	
		Min	Max	Max	Min
Coefficient de Manning du lit mineur	$n_{riviere}$	0,023	0,025	44	40
Coefficient de Manning du lit majeur (Hors zones urbaines)	n_{plaine}	0,1	0,18	10	6
Coefficient de Manning des zones urbaines	n_{urb}	0,12	0,2	8	5
Coefficient de Manning du lit mineur pour les 5 sections aval	n_{aval}	0,021	0,042	48	24
Coefficient de Manning pour les ponts	n_{pont}	0,038	0,14	26	5
Coefficient de débit des barrages	C_{bar}	2,7	3,7		
Coefficient de débit des structures latérales	C_{sl}	2,6	4		

Tableau 8.5 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres vis à vis des hydrogrammes internes et aval et des estimations des niveaux d'eau extraites de l'image satellitaire radar.

Dans le Tableau 8.5, on peut constater que l'intégration des estimations de niveau d'eau extraites d'une image satellitaire permet de réduire de manière encore plus significative le phénomène d'équifinalité. Les valeurs acceptables du Manning en lit mineur correspondent, dans le tableau de M. Pradé (Tableau A 5.1, Annexe 5) à des rivières lisses (sable ou boue) avec des pentes comprises entre 0,0006 et 0,00012, ce qui est cohérent avec la morphologie du lit mineur de la Moselle dans la zone d'étude.

Par ailleurs, les ponts et les barrages ont a priori une influence sur les niveaux d'eau plus importante localement qu'à l'échelle de la plaine. Pour évaluer localement l'influence des paramètres liés aux ponts (Manning des ponts) et aux barrages (coefficient de débit), des critères de performance locaux ($Appartenance_{niveau_loc}$ et $Dist_{niveau_loc}$) des niveaux d'eau ont été calculés. Ces derniers sont estimés à partir des résultats du modèle sur les profils proches des ouvrages hydrauliques considérés. Dans l'étude, il a été choisi d'effectuer ces calculs sur les quatre profils en travers (2 amont + 2 aval) les plus proches de l'ouvrages et sur le profil correspondant à l'ouvrage. Étant donné la disponibilité des estimations de niveau d'eau satellites sur les profils en travers, le calcul des critères de performance locaux n'a pu être effectué que pour deux ponts (pont3 et pont4) et le barrage de Koenigsmacker.

De plus, le niveau d'eau au sein des casiers hydrauliques est a priori principalement lié à la valeur du coefficient de débit de la structure latérale associée. En conséquence, une fonction d'appartenance (normée) des niveaux pour l'ensemble des casiers hydrauliques a été calculée.

Les graphiques représentant les variations des fonctions d'appartenance locales selon les valeurs des paramètres des trois ouvrages et des casiers hydrauliques sont présentés en Annexe 4 (Figure A 4.4) car leur visualisation n'est pas indispensable à la compréhension des résultats obtenus.

Pour les ponts et le barrage, les critères d'acceptabilité ont été fixés, grâce à l'interpolation entre niveaux d'eau mesurés à l'amont et l'aval à :

- $Seuil_{Appartenance_niveau_loc}(pont3)=0$ et $Seuil_{Dist_niveau_loc}(pont3)=0,75$
- $Seuil_{Appartenance_niveau_loc}(pont4)=0$ et $Seuil_{Dist_niveau_loc}(pont4)=0,7$
- $Seuil_{Appartenance_niveau_loc}(barrage)=0$ et $Seuil_{Dist_niveau_loc}(barrage)=0,81$

Pour les casiers hydrauliques, le seuil d'acceptabilité a été fixé à 1, traduisant le cas où l'ensemble des niveaux simulés dans les casiers est inclus au sein des intervalles d'estimations satellites.

L'application de ces seuils de performance n'a eu d'effet important que sur le Coefficient de débit du barrage, comme on peut le constater dans le Tableau 8.6.

Paramètres	Notation	Intervalles de valeurs acceptables (NASH et fonctions d'appartenance)		Correspondance en coefficient de frottement de Strickler	
		Min	Max	Max	Min
Coefficient de Manning du lit mineur	$n_{riviere}$	0,022	0,025	45	40
Coefficient de Manning du lit majeur (Hors zones urbaines)	n_{plaine}	0,1	0,18	10	6
Coefficient de Manning des zones urbaines	n_{urb}	0,12	0,2	8	5
Coefficient de Manning du lit mineur pour les 5 sections aval	n_{aval}	0,021	0,042	48	24
Coefficient de Manning pour les ponts	n_{pont}	0,038	0,14	26	5
Coefficient de débit des barrages	C_{bar}	3,4	3,7		
Coefficient de débit des structures latérales	C_{sl}	2,8	3,9		

Tableau 8.6 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres au regard des hydrogrammes internes et aval et des estimations des niveaux d'eau extraites de l'image satellitaire radar (performances globales et locales).

8.3.3 Conclusion

Les seules mesures d'hydrogrammes ne permettent qu'un calage partiel des paramètres du modèle. Parmi les valeurs acceptables vis à vis des hydrogrammes, certaines ne correspondent pas à celle attendues pour une rivière comme la Moselle. C'est grâce à l'intégration des étendues inondées ou des niveaux d'eau extrait d'une image satellitaire qu'il a été possible de mieux contraindre le calage. En conséquence, malgré des incohérence sur les données hydrométriques, la section 8.3 présente des résultats intéressant et montre que l'introduction des étendues inondées ou des niveaux d'eau issus de l'image RADARSAT 1 permet de mieux contraindre le modèle.

Il semble malgré tout important de remarquer que le paramètre qui est le plus contraint quelles que soient les données de calage exploitées est le coefficient de frottement en lit mineur. La sensibilité du modèle à ce coefficient est dans notre étude d'autant plus marquée que la crue étudiée a un temps de retour relativement faible (4 ans). En effet, la majeure partie du débit (~95%, valeur estimée à l'aide du modèle calé) s'écoule dans le lit mineur au moment d'acquisition de l'image satellitaire, ce qui explique que le coefficient de frottement du lit mineur soit le plus influent.

Par ailleurs, on constate que l'intégration des hydrogrammes et niveaux d'eau observés est plus efficace que l'intégration des hydrogrammes et des étendues inondées dans la procédure de calage puisque l'intervalle de valeurs acceptables du coefficient de Manning en lit mineur est plus restreint avec les niveaux d'eau qu'avec les étendues inondées. Cela est en particulier dû au fait que l'influence des paramètres du modèle sur les étendues inondées simulées est surtout marquée à l'amont de la plaine d'inondation alors que leur influence sur les niveaux d'eau simulés est plus répartie dans la

plaine. En conséquence, la sensibilité de la surface inondée aux paramètres du modèle est moins importante que pour les niveaux d'eau.

Chapitre 9.

Qualité des résultats de la méthode, discussions et perspectives

Sommaire

9.1	Qualité des résultats et des méthodes	174
9.1.1	Qualité, précision et écueils de la cartographie d'inondation à partir d'images satellitaires radar	174
9.1.2	Validation des estimations des niveaux d'eau	177
9.1.3	Discussions complémentaires sur la méthodologie d'estimation des niveaux d'eau	180
9.2	Bilan et perspectives	183
9.2.1	Réflexions générales sur les méthodologies	183
9.2.2	Généralisation de la méthode aux images satellitaires optiques	187
9.2.3	Exigences pour l'application des méthodologies d'extraction d'une carte d'inondation certaine et d'estimation des niveaux d'eau à un nouveau site d'étude	187
9.2.4	Vers une chaîne de traitement automatisée et opérationnelle	189
9.2.5	Alternatives et perspectives des méthodologies	191

Ce chapitre présente l'évaluation de la qualité des résultats obtenus aux différentes étapes des méthodologies et les discussions que la thèse a engendrées. Les données disponibles pour le site d'étude de la Moselle ne permettent pas à proprement parler de validation. Par contre, grâce à des travaux menés sur des sites d'études complémentaires, il a été possible d'évaluer au moins partiellement la qualité des cartes d'inondations et des estimations de niveau d'eau obtenues à partir d'images satellitaires radar.

Malheureusement, le modèle hydraulique calé sur la Moselle n'a pas pu être validé. Un jeu de données de validation a été collecté pour les crues d'avril-mai 1983, sous forme de Plus Hautes Eaux et d'un hydrogramme amont. Cependant, selon des informations collectées auprès des Services de la Navigation Nord Est, le lit mineur de la Moselle a été recalibré (approfondissement important) entre 1983 et 1997, ce qui rend le modèle calé sur la crue de 1997 inadapté à la modélisation des crues de 1983.

Ce chapitre est structuré en deux sections. La première vise à évaluer et discuter la qualité des méthodologies et des résultats qu'elles permettent d'obtenir. La seconde dresse un bilan des travaux de thèse et propose des perspectives.

9.1 Qualité des résultats et des méthodes

9.1.1 Qualité, précision et écueils de la cartographie d'inondation à partir d'images satellitaires radar

9.1.1.1 Estimation de la qualité de la cartographie d'étendue d'eau libre sur l'image RADARSAT de la Moselle

Sur le site de la Moselle aucune donnée complémentaire précise concernant l'étendue inondée (photographies aériennes, mesures de niveaux d'eau dans la plaine) n'a pu être obtenue. Il n'est par conséquent pas possible d'estimer la qualité de la carte d'inondation extraite de l'image satellitaire radar.

Nous avons néanmoins évalué la précision et la justesse de l'extraction de l'eau sur l'image radar à partir de la méthode proposée au Chapitre 4 grâce à une étendue d'eau permanente - la retenue d'eau de la centrale de Cattenom. Cette retenue est visible à la fois sur l'image RADARSAT de crue et sur les photographies aériennes au 25000^{ème} (hors crue). L'étendue de cette retenue d'eau varie peu car les pentes des berges sont fortes - de l'ordre de 5% et plus - et car le niveau d'eau y est maintenu sensiblement constant par EDF. En conséquence, nous avons supposé l'étendue de la retenue d'eau invariante entre les dates d'acquisition de l'image radar et des photographies aériennes.

Trois cartes de la retenue d'eau ont pu être obtenues respectivement par photo-interprétation sur les photographies aériennes - carte PI - et par double seuillage de l'image radar - carte radar par excès et défaut - (seuils égaux à ceux proposée au §8.1.1). En considérant la carte PI comme référence (« vérité terrain »), la comparaison des trois cartes permet d'évaluer au moins partiellement la qualité de cartographie d'étendues d'eau libre sur l'image radar. Pour comparer ces trois cartes, deux matrices de confusion ont été calculées. Le Tableau 9.1, présente les termes de la matrice de confusion obtenue à l'issue de la comparaison.

Confusions et détections correctes	Carte radar par défaut	Carte radar par excès
Détections correctes (%)	93	98
Sous-détections (%)	7	2
Sur-détections (%)	4	16

Tableau 9.1 : Termes des matrices de confusion obtenues par comparaison entre les cartes radar et PI de la retenue d'eau de la centrale de Cattenom (en pourcentage de l'aire de la retenue sur la carte PI).

Dans le Tableau 9.1, les sous-détections correspondent aux pixels de la carte PI non détectés sur la carte radar, les sur-détections aux pixels détectés sur la carte radar qui ne coïncident pas avec l'étendue de la carte PI. Pour être représentatif vis à vis de la surface de la retenue d'eau, l'ensemble des résultats présentés dans le Tableau 9.1 correspondent à des surfaces normalisées (en pourcentage) par la surface de la retenue d'eau (carte PI).

Dans le Tableau 9.1, les pourcentages de sur-détections sur la carte radar par excès et d'oublis sur la carte radar par défaut sont faibles, inférieures à 5%. Ces deux pourcentages sont les plus représentatifs

de la qualité de la cartographie car l'objectif des deux cartes issues de l'image radar est d'encadrer l'étendue d'eau libre réelle. En effet, dans la méthode de cartographie des étendues d'eau libre un des objectifs a été de définir des limites floues (zone comprise entre les carte par défaut et excès) qui incluent la limite réelle de la surface en eau. Or, la limite réelle est incluse au sein des limites floue d'une carte RADAR si et seulement si les pourcentages de sur-détections sur la carte radar par excès et d'oublis sur la carte radar par défaut sont nulles.

En conséquence, les faibles pourcentages de sur-détections sur la carte radar par excès et de sous-détections sur la carte radar par défaut impliquent une bonne adéquation entre surfaces en eau extraites de l'image radar et données complémentaires au regard des objectifs de la méthode. De plus, elle valide l'hypothèse d'effets dus aux vents restreints sur l'image RADARSAT.

Par ailleurs, pour estimer la qualité de positionnement de la limite de la retenue d'eau, la limite floue de la carte radar a été comparée à la limite de la carte PI (appelée « limite vraie » dans la suite). Cette comparaison montre que 90% de la « limite réelle » est incluse au sein des limites floues radar. De plus, la distance maximale observée entre ces deux limites est de l'ordre de 20m. Cette distance est cohérente avec l'incertitude de positionnement de la limite d'inondation, due à la Résolution Spatiale Équivalente de l'image radar (30m) et à la Précision du Géoréférencement de l'image radar (10m), qui est prise en compte dans la méthode de cartographie des étendues inondées lors de la dilatation des limites floues.

En conclusion, les travaux présentés dans cette section, bien que limités à une petite partie de l'image radar, montrent des résultats de cartographie cohérents avec des données plus précises et plus fines issues de photographies aériennes au 25000^{ème}.

Remarque : la mise en confrontation de la carte d'inondation radar avec les informations collectées dans les journaux (Républicain Lorrain, 27/02/1997; Républicain Lorrain, 28/02/1997) concernant les routes coupées lors de la crue a montré des points de concordance. En effet, les trois routes déclarées coupées dans les journaux le sont effectivement par la carte d'inondation radar. Cette confrontation, bien que très restreinte montre une cohérence locale entre des informations extraites de l'image radar et des observations in situ.

9.1.1.2 Enseignements complémentaires apportés par des images radar ERS-1 : Site de la Meuse

Cette section vise à compléter et généraliser les résultats obtenus pour l'image RADARSAT de la Moselle grâce à des travaux sur d'autres images, pour un autre site d'étude : la Meuse. Sur ce site, l'application d'une partie des méthodologies de cartographie d'inondation proposée au Chapitre 4 a permis de tirer des enseignements complémentaires et d'évaluer les possibilités de généralisation de ces méthodologies.

Sur le site de la Meuse, une série temporelle de trois images de crue a été exploitée. Le caractère filiforme de la Meuse à l'aval de Verdun rend la méthode d'estimation des niveaux d'eau peu adaptée. C'est pourquoi cette méthode n'a pas été appliquée pour la Meuse. Les travaux sur ce site d'étude se sont attachés à analyser les images afin d'ouvrir la discussion sur la qualité de la cartographie d'inondation à partir d'images satellitaires radar. Les images ERS de la Meuse nous ont amenés à considérer d'autres problématiques et d'autres contraintes que pour l'image RADARSAT de la

Moselle. La méthode de cartographie employée sur les images de la Meuse est identique à celle proposée au chapitre 5. Les modalités d'application de cette méthode et les cartes d'inondations obtenues sont présentées en Annexe 3.

De façon générale, les taches d'inondations obtenues à partir des images ERS sont beaucoup plus perturbées et bruitées que celles obtenues pour l'image RADARSAT. En effet, les cartes d'inondation ERS sont très discontinues sur le linéaire de rivière étudiée. De plus, plus localement, les taches d'inondation sont « trouées », sans raison topographique apparente. Cette constatation est en partie explicable par une dynamique radiométrique plus faible sur les images ERS que sur les images RADARSAT, source de confusions radiométriques plus importantes.

D'autre part, les zones dans lesquelles le lit de la Meuse est situé dans des gorges sont fortement soumises aux effets d'ombrages dus au relief, ce qui est plus problématique que dans le cas de la Moselle car les zones d'engorgement de la Meuse sont nombreuses.

Par ailleurs, la confrontation des cartes d'inondation avec des données topographiques et une visite de terrain ont permis de mettre en évidence des sous-détections importantes sur le parcellaire agricole, dues à la présence de jachères. Sur ces dernières, si les hauteurs d'eau sont faibles, la végétation est émergée et perturbe la détection de l'eau. Cet effet est d'autant plus marqué que les images utilisées pour le site de la Meuse sont des images acquises en polarisation VV (Figure 9.1, p.176). En effet comme on l'a vu au paragraphe 2.2.4.4, une polarisation VV du capteur implique une plus grande sensibilité du radar aux objets verticaux. La présence de jachères partiellement émergées au sein de la zone inondée est en conséquence responsable d'une absence d'information concernant la présence ou non de l'inondation, qui se répercute sur la connaissance des limites de l'inondation.

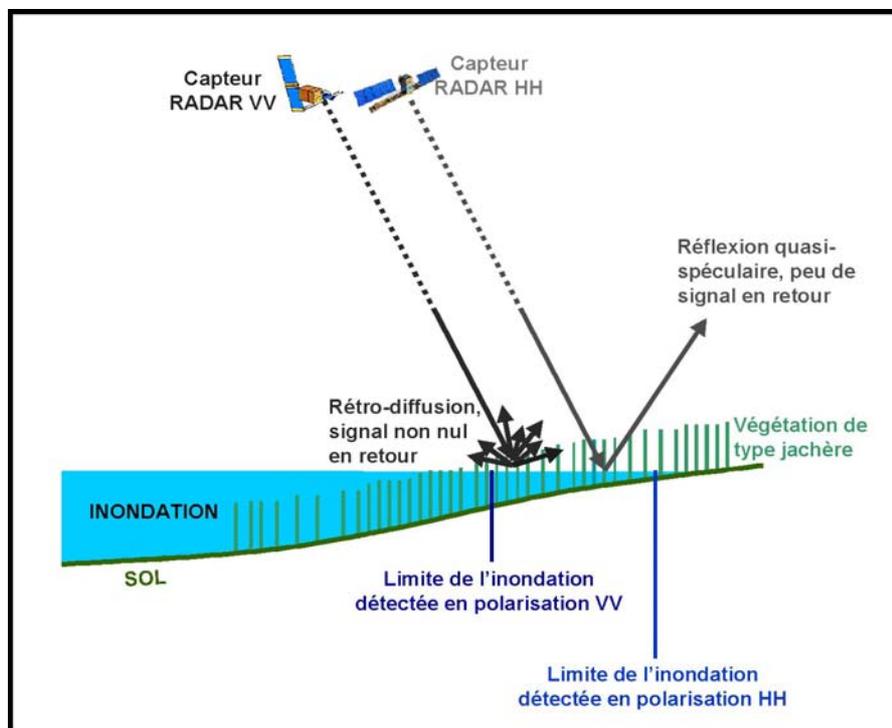


Figure 9.1 : Influence de la végétation basse (de type jachère agricole) sur le signal rétro-diffusé selon la polarisation du capteur radar.

Dans le cas de la Moselle, les zones où l'information eau-non eau est incertaine sont principalement les zones urbaines, les zones de végétation hautes, et épisodiquement les lignes électriques parallèles à l'orbite du satellite et les poteaux des lignes électriques à haute tension. Dans le cas de la Meuse, à cette liste s'ajoutent les zones de végétation basse partiellement émergée.

L'ensemble de zones non pertinentes entraîne des oublis dans les cartes d'inondation radar. En conséquence, en dehors des effets dus au speckle et au relief, une tache d'inondation radar apparaît de façon générale comme une **information par défaut de l'étendue inondée réelle**.

9.1.2 Validation des estimations des niveaux d'eau

Estimation de la précision des estimations de niveaux d'eau

Les estimations de niveaux d'eau obtenues pour le site d'étude de la Moselle n'ont pu être validées localement car aucune mesure de niveaux d'eau in situ n'est disponible pour la plaine d'inondation pendant la crue de 1997.

Par contre, dans le cadre d'une collaboration avec le Centre de Recherche public Gabriel Lippmann (CRPGL), Grand-duché du Luxembourg, des travaux de validation ont pu être effectués sur le site d'étude de l'Alzette. Pour estimer la précision des estimations des niveaux d'eau fournies par la méthode proposée, celle-ci a été appliquée à un tronçon de 10 km de l'Alzette.

Pour estimer des niveaux d'eau, la méthodologie proposée au Chapitre 5 s'appuie sur le croisement entre de segments informatifs avec un modèle numérique de terrain, les segments informatifs étant les parties des bordures d'une carte d'inondation satellitaire, qui permettent d'estimer de façon précise des niveaux d'eau.

Pour l'Alzette, la carte d'inondation utilisée a été extraite d'une image satellitaire radar ENVISAT multipolarisation (capteur ASAR, polarisation VH et VV, bande C, angle d'incidence 35°, taille du pixel : 12,5m, Résolution Spatiale Effective de l'ordre de 30m) lors de travaux précédents au CRPGL (Matgen et al., 2004; Matgen & Pfister, 2004; Schumann et al., 2006). Cette image a été acquise au moment du passage du pic de crue dans la plaine. Pour en extraire une carte d'inondation, un seuillage radiométrique a été appliqué à cette image (valeur du seuil optimisée grâce à des mesures de terrain de lasses de crues).

Pour définir des segments informatifs à partir de la carte d'inondation extraite de l'image radar, deux phases successives ont été utilisées :

- extraction des limites de l'étendue inondée,
- création d'un masque « niveau », qui représente les zones qui ne permettent pas d'estimer des niveaux d'eau de façon précise par croisement des limites d'inondation avec un MNT fin,
- application du masque niveau aux limites de l'étendue inondée pour en extraire les segments informatifs.

Les limites de l'inondation ont été extraites grâce à une opération d'érosion/dilatation mathématique de la carte d'inondation, suivie d'une différence d'images entre les cartes d'inondations dilatée et érodée (Figure 9.2A).

Le masque niveau (Figure 9.2B) a été généré à partir d'une image IKONOS à Très Haute Résolution spatiale (bandes spectrales Bleu-Vert-Rouge, taille du pixel : 2 m) et d'un MNT LiDAR (Taille du pixel : 1m, précision altimétrique : ± 15 cm, données fournisseur). Il représente les zones d'arbres, de bâtiments, et les structures topographiques.

Le croisement entre les limites de l'étendue inondée et le masque niveau a ensuite permis d'extraire les segments informatifs (Figure 9.2C). La carte d'inondation utilisée ayant des limites « nettes », une erreur moyenne de positionnement qui traduit la présence de pixels partiellement inondés a été estimée à partir de la carte d'inondation de la Moselle (100m), et ajoutée à la Résolution Spatiale Effective de l'image radar initiale (30m) et à une Précision de son Géoréférencement estimée à un pixel (12,5m) pour dilater les segments informatifs.

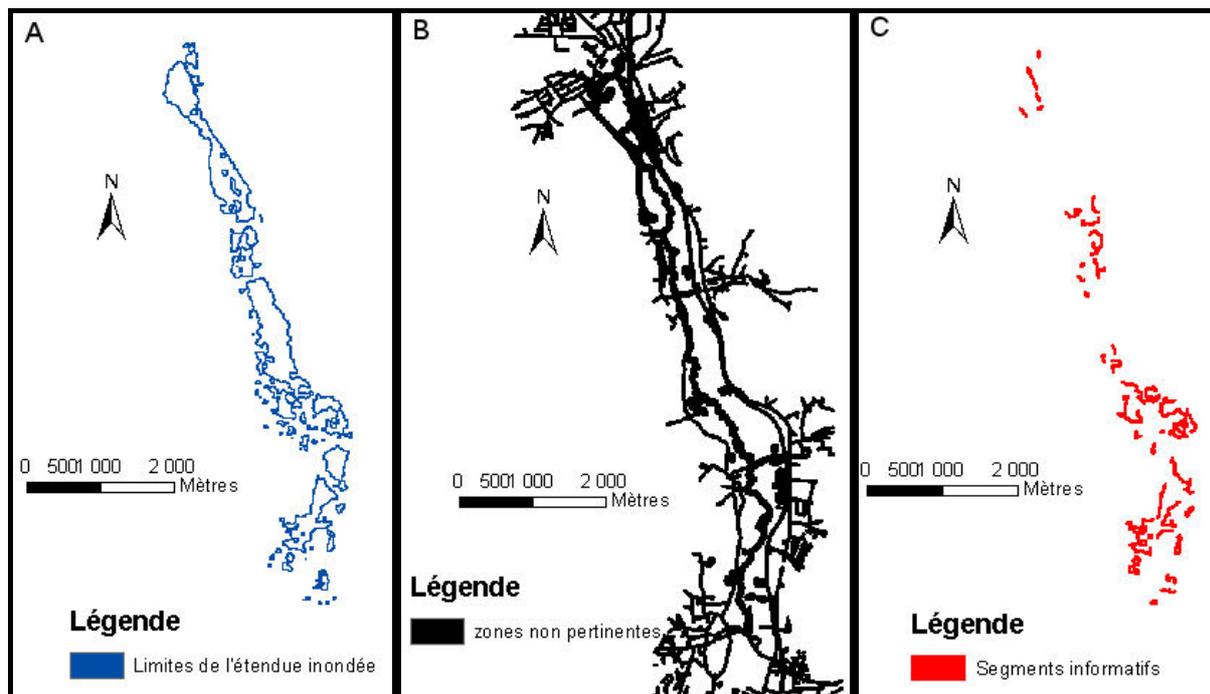


Figure 9.2 A à C : Des limites de l'inondation aux segments informatifs pour le site de l'Alzette.

Les segments informatifs dilatés ont par la suite été croisés sous SIG avec le MNT LiDAR. Après prise en compte de la précision altimétrique des données topographiques (± 15 cm), des estimations primaires de niveaux d'eau ont été obtenues avec une demi-incertitude moyenne (Cf. définition au §5.3) estimée à 80cm.

La hiérarchie hydraulique a été déterminée à partir de la géométrie d'un modèle hydraulique 1D développé au CRPGL (Figure 7.9A). Chaque pixel du MNT coïncidant avec un segment informatif est rattaché à un profil en travers de la géométrie du modèle hydraulique grâce à une distance de capture (demi-distance moyenne entre deux profils en travers consécutifs : 100m). Les sections en travers du modèle hydraulique auxquels des pixels du MNT ont été rattachés sont affectées d'un intervalle d'altitude. L'algorithme de mise en cohérence hydraulique a finalement été appliqué aux intervalles d'estimation des niveaux d'eau rattachés aux profils en travers du modèle. Après application de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique, des estimations finales de niveaux d'eau ont été obtenues avec une demi-incertitude moyenne de 40 cm. En considérant la valeur moyenne de ces intervalles comme l'estimateur le plus probable du niveau d'eau réel, la comparaison de celles-ci avec

des mesures in situ de PHE (sur 7 profils en travers) fournit une estimation de la précision des estimations de niveaux d'eau. Dans le cas de l'Alzette, avec 7 points de contrôle, la RMSE calculée est de 13cm. Ce résultat est particulièrement intéressant car il est un indicateur de la précision réelle des estimations de niveau d'eau. En effet, alors que la demi-incertitude moyenne traduit une incertitude sur les estimations de niveaux d'eau, la RMSE calculée est un estimateur de l'écart entre la moyenne de ces estimations et des mesures in situ.

Par ailleurs, l'ensemble des 7 valeurs mesurées in situ est inclus au sein des intervalles d'estimations finales de niveau d'eau. Cela valide au moins partiellement l'hypothèse selon laquelle les intervalles d'estimation de niveaux d'eau obtenus à l'issue de la méthode incluent le niveau d'eau réel

En conséquence, ce résultat montre une bonne précision des estimations des niveaux d'eau par la méthode, tout à fait acceptable au regard de celle requises dans le cadre de la modélisation hydraulique.

Comparaison des résultats de la méthodologies d'estimations des niveaux d'eau avec des travaux similaires

Parmi les travaux similaires, il est possible de citer les travaux de (Brakenridge et al., 1998) et ceux de (Raclot, 2003a).

Dans les travaux de (Brakenridge et al., 1998), des niveaux d'eau ont été estimés grâce à un croisement de limites d'inondation extraites d'une image satellitaire radar ERS avec des courbes de niveaux. Dans cette étude, les incertitudes sur les estimation de niveaux d'eau sont comprises entre un et trois mètres, ce qui est plus important que dans la thèse. La différence importante entre les deux travaux est en particulier imputable à la mise en cohérence hydraulique. En effet l'incertitude moyenne sur les estimations primaires de niveaux d'eau (avant la mise en cohérence hydraulique) est de 1,6 m, c'est à dire du même ordre de grandeur que celles obtenues par (Brakenridge et al., 1998). Ce résultat montre tout l'intérêt de contraindre les estimations de niveaux d'eau par la logique hydraulique de l'écoulement.

Les travaux de (Raclot, 2003a) sont basés sur une phase de croisement entre des informations - limites d'inondation et état de submersions des objets - extraites de photographies aériennes de crue et un MNT fin, suivie d'une phase de mise en cohérence hydraulique. Les estimations de niveaux d'eau obtenues ont des demi-incertitudes de l'ordre de 15-20 cm selon les sites d'études. Les estimations obtenues dans la thèse sont donc des incertitudes plus importantes, en particulier en raison d'une donnée de base –images satellitaires- avec une résolution spatiale plus grossière.

Pour résumer cette section, le Tableau 9.2 présente un comparatif des incertitudes obtenus dans les différents travaux cherchant à estimer des niveaux d'eau à partir d'images de crues.

	Images satellitaires radar (thèse)		Images satellitaires radar ERS (Brakenridge et al., 1998)	Photographies aériennes (Raclot, 2003a) (variable suivant le site d'étude)
	Moselle	Alzette		
Demi-incertitude primaire (cm)	65	80	50-150	24 – 32
Demi-incertitude finale (cm)	38	40	Pas de mise en cohérence hydraulique	15 – 20
Erreur moyenne/mesures in situ (cm)	Non estimée	13	Non estimée	Non estimée

Tableau 9.2 : Comparatif des demi-incertitudes sur les estimations des niveaux d'eau obtenues à partir d'images satellitaires radar, des photographies aériennes.

9.1.3 Discussions complémentaires sur la méthodologie d'estimation des niveaux d'eau

En complément de la validation des estimations de niveaux d'eau, cette section présente des travaux et réflexions complémentaires qui ont été menées afin de discuter l'intérêt de la mise en cohérence hydraulique et du découpage des segments informatifs et de généraliser les estimations de niveaux d'eau ponctuelles à l'échelle de la plaine.

Intérêts et limites de la mise en cohérence hydraulique.

La mise en cohérence hydraulique des estimations primaires de niveaux d'eau nécessite la détermination d'un schéma de circulation des eaux. Sans hypothèse d'un écoulement monodimensionnel, ce schéma de circulation des eaux ne peut être déterminé a priori. En conséquence, la méthode propose une phase d'expertise hydraulique guidée, rendue peu subjective grâce à la définition de contraintes et de principes de construction de la hiérarchie. Elle a pour objectif de fournir des directions principales d'écoulement dans la plaine et est basée sur l'analyse combinée de données topographiques (structures et courbes de niveau) et de l'image radar en crue.

Par conséquent, cette méthode ne peut être efficace que dans une plaine dont les schémas d'écoulements sont relativement simples à déterminer grâce à des données topographiques et une image radar. En effet, dans le cas d'écoulements très complexes comme dans la plaine aval de l'Hérault, les relations d'ordre qui pourraient être définies grâce à des données topographiques et une image satellitaire radar suivant les critères évoqués dans le paragraphe 3.3.1 seraient en nombre très réduit. La mise en cohérence hydraulique n'aurait par conséquent qu'une efficacité restreinte.

Au contraire, pour le site d'étude de la Moselle, la mise en cohérence hydraulique est très efficace car elle réduit de plus de 50 % les incertitudes d'estimation des niveaux d'eau. D'autre part, le nombre très réduit de conflits – moins d'1 % des estimations primaires ponctuelles de niveaux d'eau en conflit sur l'ensemble de la plaine : 2 segments informatifs en conflits sur 231 au total - valide au moins partiellement la hiérarchie hydraulique construite.

Analyse de sensibilité des estimations finales de niveaux d'eau à la taille de découpage des segments informatifs.

Au cours de la mise en cohérence hydraulique des estimations des niveaux d'eau, les segments informatifs sont découpés. Pour juger de l'intérêt de ce découpage, une analyse de sensibilité des résultats de la mise en cohérence hydraulique à la taille du découpage de segments informatifs a été réalisée. Les résultats de cette analyse de sensibilité sont proposés dans le Tableau 9.3.

Taille de découpage des segments informatifs (m)	Nombre de segments informatifs	Nombre de conflits rencontrés	Demi-incertitude moyenne (m)	Écart type de la demi-incertitude (m)	Demi-incertitude minimale (m)	Demi-incertitude maximale (m)
80	231	1	0,38	0,17	0,09	0,96
110	150	1	0,42	0,17	0,09	0,96
140	113	0	0,46	0,18	0,09	1,01
170	92	0	0,47	0,18	0,09	1,02
200	78	0	0,51	0,20	0,10	1,02
400	60	0	0,54	0,23	0,17	1,21

Tableau 9.3 : Analyse de la sensibilité des résultats de la mise en cohérence hydraulique à la taille du découpage de segments informatifs.

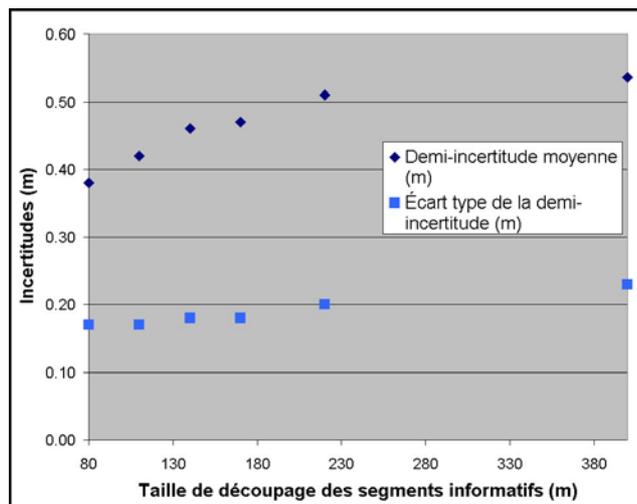


Figure 9.3 : Évolution des incertitudes d'estimation des niveaux d'eau en fonction de la taille de découpage des segments informatifs

Les tailles de découpage des segments informatifs ont été examinées entre 80 m et 400 m, tailles limites des segments informatifs représentatives vis à vis de l'image radar et cohérente avec une précision attendue (Cf.§ 5.2.2.4). Cette analyse de sensibilité montre l'intérêt du découpage des segments informatifs pour la réduction des incertitudes sur les estimations des niveaux d'eau. En effet, dans le Tableau 9.3 et la Figure 9.3 plus la taille de découpage des segments informatifs est fine, plus les incertitudes moyennes, maximales et minimales sont faibles avec un écart de demi-incertitude moyenne de 26 cm entre des tailles de découpage de 80 et 400 m. Cela montre que la taille de découpage des segments informatifs affectée lors de l'application de la méthode est un bon compromis

entre représentativité vis à vis de l'image radar et réduction des intervalles d'estimation du niveau d'eau.

Généralisation des estimations ponctuelles de niveaux d'eau - création d'une « carte d'inondation MNT » pour la Moselle

Les estimations des niveaux d'eau extraites par la méthode permettent de recalculer la zone inondée à partir du Modèle Numérique de Terrain. Pour cela, une solution simple est une interpolation linéaire en mode TIN à partir des niveaux d'eau « radar » - minimum, maximum et moyens - estimés pour chaque segment informatif. Les résultats sont présentés dans la Figure 9.4 (p.182).

En comparaison avec la carte d'inondation radar initiale, la carte d'inondation MNT montre une capacité à combler des lacunes dans les zones urbaines et arborées. Sur cette carte d'inondation MNT, les limites de l'inondation sont cohérentes vis à vis de la topographie.

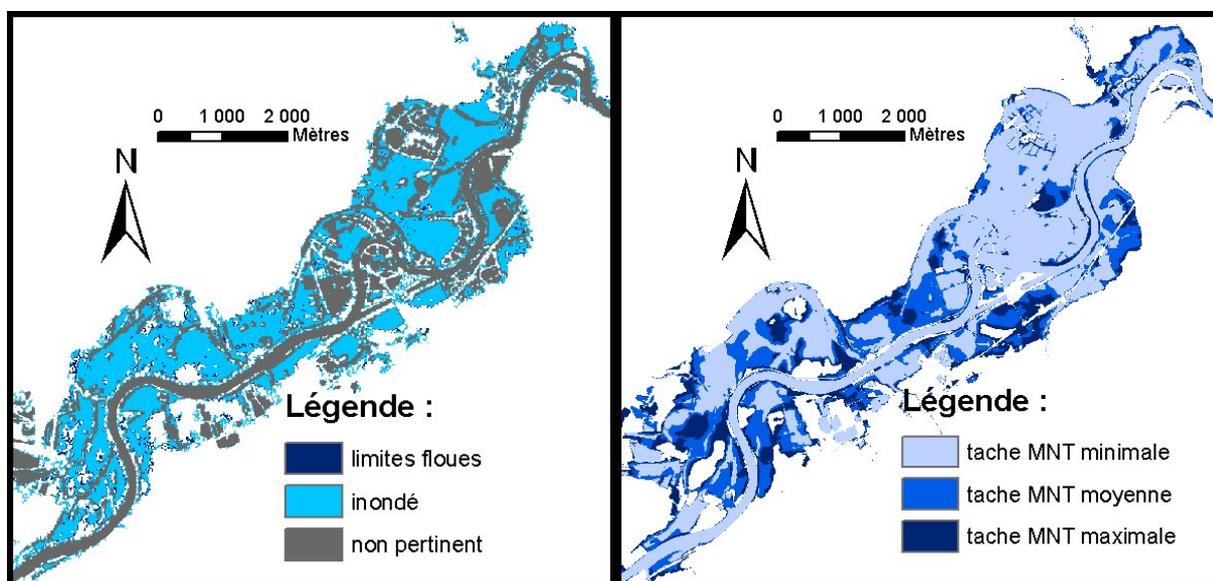


Figure 9.4 A et B : Taches d'inondations radar (à gauche) et tache MNT.

A : tache d'inondation radar avec classification des pixels selon la pertinence locale.

B : superposition des cartes MNT (resp. minimale, moyenne et maximale) obtenues par remplissage du MNT aux niveaux d'eau calculés par interpolation linéaire des estimations ponctuelles (resp. N_{min}^i , N_{moy}^i , N_{max}^i).

Le Tableau 9.4 présente les termes des matrices de confusion obtenues par comparaison entre les cartes MNT et la carte radar, zones urbaines et de végétation haute et limites floues non comprises.

Confusions et estimations correctes	Tache MNT maximale	Tache MNT moyenne	Tache MNT minimale
Estimations correctes (%)	97	80	43
Sous-estimations (%)	3	20	57
Sur-estimations (%)	21	12	6

Tableau 9.4 : Termes des matrices de confusion obtenues par comparaison entre les cartes d'inondation MNT et radar, en dehors des zones urbaines, des zones de végétation haute et des limites floues.

Ce tableau montre que la carte MNT maximale sous-estime peu (à 3%) l'étendue inondée observée par radar et inversement que la carte MNT minimale sur-estime peu (à 6%) l'étendue inondée observée par radar. Cela signifie que les cartes MNT maximale et minimale encadrent globalement la carte d'inondation extraite de l'image et sont cohérente vis à vis de cette dernière. Cela converge vers l'idée que la superposition des cartes MNT comble les lacunes de la tache radar. Cependant les sous-estimations importantes sur la carte d'inondation MNT minimale et les sur-estimations importantes sur la carte d'inondation MNT maximale montrent que ces cartes MNT ont peu de valeur informative vis à vis de la carte d'inondation extraite de l'image RADAR.

9.2 Bilan et perspectives

Le paragraphe suivant dresse un bilan de la thèse et propose des perspectives de valorisation des résultats obtenus. Il présente les raisons et choix qui ont motivé la thèse ainsi que les avancées méthodologiques apportées, leurs intérêts et leurs limites.

9.2.1 Réflexions générales sur les méthodologies

Les méthodologies exploitent des images satellitaires radar de crues pour la cartographie d'inondation, l'estimation des niveaux d'eau et l'aide à la modélisation hydraulique des inondations. Pour évaluer leurs intérêts, nous allons examiner un certain nombre de points.

9.2.1.1 *Choix des données et intérêt des méthodologies*

Le choix des images satellitaires

Une première question concerne les types de données : pourquoi utiliser des images satellitaires au détriment des photographies aériennes (PA), de résolutions plus fines et a priori non affectées par le couvert nuageux, puisque acquises en dessous de ce dernier ?

L'avantage des images satellitaires par rapport aux photographies aériennes est double. D'une part, contrairement aux photographies aériennes, les images satellitaires ne nécessitent pas, en plaine d'inondation, de prétraitements lourds et délicats pour le géoréférencement. Cela explique en particulier le fait qu'elles soient adaptées au contexte opérationnel. D'autre part, elles ont la capacité de fournir des observations sur de longs linéaires de cours d'eau, si l'orbite du satellite n'est pas perpendiculaire au cours d'eau, ce qui permet de connaître assez rapidement l'étendue inondée sur de vastes territoires. Par contre, un inconvénient majeur des images satellitaires à haute résolution spatiale (décamétrique) est de ne pas être assez fines pour fournir des informations sur les sens et directions d'écoulement dans la plaine.

Le choix des images radar

Le choix a été fait de s'attacher à l'analyse d'image radar en raison du pouvoir d'acquisition « tout temps » des systèmes radar. En effet, les crues sont souvent accompagnées d'un couvert nuageux important et ne se produisent pas nécessairement de jour. L'exemple des images radar exploitées dans la thèse le confirme : celles-ci ont toutes été acquises de nuit (vers 22h pour ERS et 6h pour

RADARSAT). La probabilité d'acquérir une image d'inondation synchronisée avec le passage du pic de crue est en conséquence plus importante que pour les satellites optiques.

Comme on a pu le voir au Chapitre 4 l'extraction de l'eau à partir d'images radar est relativement aisée et peut être réalisée par une technique simple de seuillage radiométrique.

Un bémol doit cependant être apporté au discours car, en présence de vent important à la date d'acquisition d'une image satellitaire radar, les vaguelettes formées à la surface de l'eau tendent à augmenter sa rétrodiffusion et peuvent, selon les caractéristiques du capteur (longueur d'onde, polarisation), la rendre difficilement détectable sur l'image.

Intérêt et limites des cartes d'inondation obtenues à partir d'images satellitaires.

En dehors des prétraitements géométriques et radiométriques nécessaires à l'exploitation des images radar, l'obtention d'une carte d'inondation peut être automatisée. Par contre, pour parvenir à une carte d'inondation au sein de laquelle la présence ou l'absence d'eau est certaine la méthode n'est automatisable que sous certaines conditions. En effet, comme nous avons pu le constater certains objets susceptibles de masquer l'eau sont difficiles à déterminer a priori, en particulier les jachères et les lignes électriques parallèles à l'orbite du satellite. Ces perturbations restent relativement anecdotiques sur une image et il semble raisonnable de supposer que la cartographie des arbres et des bâtiments permet de connaître, dans une majorité des cas, les zones dans lesquelles l'information eau-non eau fournie par une image radar est potentiellement incertaine. Ceci implique, une mise en œuvre relativement aisée de la méthode de cartographie et une utilisation possible dans un cadre opérationnel, comme dans le cadre de la charte « Espace et Catastrophes Majeures ».

Par ailleurs, les cartes d'inondation satellitaires offrent des visions objectives d'étendues inondées qu'il est peu envisageable d'obtenir sans le concours de la télédétection. Pour la gestion des inondations hors contexte de crise, elles peuvent alimenter des bases de données historiques sur les crues, et être utiles à la modélisation hydraulique. En effet, comme on a pu le voir, l'introduction, dans une procédure de calage, de la connaissance - au moins partielle - des étendues inondées permet de réduire le phénomène d'équifinalité, ce qui permet d'obtenir des modèles mieux contraints et plus fiables en prévision.

L'inconvénient de l'utilisation des cartes d'inondation satellitaires pour le calage d'un modèle hydraulique est principalement une manipulation des données un peu lourde. En effet, cette utilisation suppose d'avoir un modèle dans le quel les surfaces inondées simulées sont fournies, ou d'ajouter en sortie du modèle une étape de construction des surfaces inondées simulées à partir des résultats de ce dernier.

Par ailleurs, de même que pour le calage, les cartes d'inondation peuvent être exploitées pour la validation de modèles hydrauliques.

Intérêt des estimations des niveaux d'eau

Les estimations des niveaux d'eau sont sources d'informations très utiles pour la gestion des inondations. Elles peuvent alimenter des bases de données inondation, au même titre que des données de plus hautes eaux mesurées sur le terrain. Un avantage des niveaux d'eau satellitaires est de fournir des résultats correspondant à une observation de la crue elle-même et non de traces laissées par celle-

ci. Même si la précision d'estimation des niveaux d'eau est faible par rapport à des mesures au sol, les images satellitaires ont pour avantage de fournir des données d'emprises spatiales au sol importantes et la plupart du temps avec une continuité sur de longs linéaires de cours d'eau. Elle permet donc des estimations concomitantes sur de grandes étendues. De plus, compte tenu des difficultés de circulation au sol en période de crue, des mesures de niveaux d'eau in situ avec des densités et sur des étendues comparables à celles présentées dans la thèse paraissent peu envisageables.

Les estimations de niveaux se sont avérées utiles et adaptées pour la réduction de l'équifinalité dans le calage du modèle hydraulique de la Moselle. Cela montre une valorisation et un champ d'application importants des images satellitaires de crue dans le cadre de la modélisation hydraulique.

Dans le cas particulier où l'objectif est d'utiliser les estimations de niveau d'eau pour la modélisation hydraulique 1D ou 1D-casier, la hiérarchie hydraulique dans la plaine est imposée dans la géométrie du modèle. Cela implique une mise en œuvre de la méthode d'estimation relativement aisée. Cela a part ailleurs été confirmé pour le site d'étude de l'Alzette où des estimations de niveau d'eau conformes à des mesures in situ ont pu être calculées facilement. Au cours de la thèse, seule la mise en cohérence hydraulique a été automatisée, les étapes préliminaires étant réalisées sous SIG, mais l'automatisation complète est tout à fait envisageable.

Dans un contexte d'analyse plus fine de crues (modèles 2D), ou pour des sites d'études dans lesquels la modélisation 1D est mise en défaut, la définition d'une hiérarchie hydraulique implique une phase d'expertise qui ne peut pas être automatisée.

Intérêts et limites de la procédure de calage

La procédure de calage présentée au Chapitre 6 est inspirée de la méthode GLUE qui a été éprouvée et utilisée dans de nombreux travaux. Elle a pour avantage de prendre en considération les incertitudes sur les données observées. Dans la thèse, l'apport méthodologique est l'intégration, dans la procédure de calage des surfaces inondées certaines et des estimations de niveaux d'eau. En ajoutant aux informations mesurées in situ (par exemple hydrogramme aval), des caractéristiques hydrauliques extraites d'images satellitaires, dans le calage, le modèle hydraulique est mieux contraint et a priori plus performant en prévision. Le principal inconvénient de la méthodologie de calage est un temps de calcul très long à cause du nombre important de simulations Monte Carlo qu'il est nécessaire d'effectuer. Cette méthode est par conséquent particulièrement adaptée à des modèles dont les temps de calcul sont courts, par exemple les modèles hydrauliques 1D ou 1D-casier.

Le regret important dans la thèse a été l'absence d'une validation du modèle hydraulique calé sur un autre événement hydrologique.

9.2.1.2 Critères d'applicabilité de la méthode d'estimation des niveaux d'eau

Dans un souci de généralisation de la méthode d'estimation des niveaux d'eau, cette section vise à discuter ses limites et ses critères d'applicabilité. L'objectif est de déterminer sur quels types de sites d'études et avec quelles images cette méthode est adaptée et pertinente.

Caractéristiques morphologiques du terrain.

Pour pouvoir appliquer la méthode d'estimation des niveaux d'eau, il est nécessaire que la largeur de l'étendue inondée soit représentative vis à vis des incertitudes sur le positionnement de la limite de l'inondation. Prenons par exemple le cas de la Moselle et de la Meuse, avec des images radar de taille de pixel 12,5m et de Résolution Spatiale Équivalente de l'ordre de 30m. Considérons l'incertitude du géoréférencement de l'ordre de la taille du pixel de l'image (12,5m). Supposons de plus que l'incertitude de positionnement de la limite d'inondation liée à la présence de pixels partiellement inondés est d'au moins un pixel. Ces valeurs ramènent l'incertitude minimale de positionnement de la limite de l'inondation à $30+12,5+12,5=55\text{m}$, et ce sur chaque rive de la rivière. En conséquence, si la largeur de l'étendue inondée est inférieure à $55*2=110\text{m}$, l'application de la méthode d'estimation des niveaux d'eau n'a aucun sens car la largeur de l'étendue inondée est du même ordre de grandeur que les incertitudes sur le positionnement de ses limites.

Par ailleurs, comme indiqué au Chapitre 5, la qualité des estimations de niveau d'eau est fortement liée à la variabilité altimétrique du terrain naturel. Dans la méthode, pour obtenir des estimations brutes de niveau d'eau avec des incertitudes relativement faibles, les zones à forte variabilité altimétriques sont éliminées de l'analyse. En plaine d'inondation assez large, les pentes du terrain sont majoritairement faibles. En conséquence, les zones retirées de l'analyse à cause de leur forte variabilité altimétrique sont en quantité restreinte, et correspondent principalement aux talus, digues et voies de communication surélevées. Par contre, avec un lit majeur étroit, par exemple en présence de gorges, ces zones sont très nombreuses. Cela entraîne une élimination de l'analyse de zones étendues et donc potentiellement une absence d'estimation des niveaux d'eau sur de longs linéaires de cours d'eau. En considérant par exemple une incertitude minimale de positionnement des limites d'inondation de l'ordre de 55m (Cf. précédemment), une pente locale du terrain au droit de la limite d'inondation de 2% implique une incertitude minimale d'estimation du niveau d'eau local de l'ordre de 1,10m qui paraît beaucoup trop importante au regard des précisions requises pour l'aide à la modélisation hydraulique.

Date d'acquisition des images : synchronisation avec le pic de crue

Pour pouvoir employer la méthode d'estimation des niveaux d'eau, il est de plus nécessaire que les hauteurs d'eau¹⁷ dans la plaine inondée soient suffisantes vis à vis des incertitudes sur les estimations des niveaux d'eau. En effet, si les hauteurs d'eau sont du même ordre de grandeur que les incertitudes sur les estimations des niveaux, l'application de cette méthode n'est pas pertinente.

Ceci montre l'importance de la correspondance entre la date d'acquisition des images satellitaires et la date de passage du pic de crue dans la plaine d'inondation. Lorsqu'une image est acquise à une date proche du pic de crue, pendant les phases actives de la crue, les hauteurs d'eau sont suffisantes pour que les estimations de niveau d'eau soient pertinentes.

¹⁷ La hauteur d'eau désigne ici une épaisseur, c'est à dire la différence entre l'altitude de la surface libre de l'eau et celle du sol.

9.2.2 Généralisation de la méthode aux images satellitaires optiques

La thèse a montré le potentiel des images satellitaires radar pour l'estimation des niveaux d'eau en plaine inondée et l'aide au calage de modèles hydrauliques. Une question complémentaire est la transposabilité de la méthode aux images satellitaires optiques.

L'analyse combinée d'une image satellitaire SPOT4 en période de crue et de photographies aériennes acquises à la même date, sur le site d'étude de l'Hérault nous a permis d'aborder cette question. La méthode de cartographie et les résultats obtenus pour le site d'étude de l'Hérault sont présentés en Annexe 6. Les qualités des cartes d'inondations semblent a priori sensiblement équivalentes avec des images optiques et radar. Cela permet de supposer que des estimations des niveaux d'eau relativement précises peuvent être obtenues avec des images satellitaires optiques. On peut en déduire que la seule partie de la méthode qui doit potentiellement subir des modifications est la cartographie de l'inondation.

Cependant, dans le cas de l'Hérault, l'image SPOT a été acquise quatre jours après le passage du pic de crue, soit en période de décrue avancée. Ce délai trop important ne permet pas d'appliquer la méthode d'estimation des niveaux d'eau en raison de hauteurs d'eau faibles dans la plaine.

Ce cas d'étude souligne le principal inconvénient des images satellitaires optiques par rapport aux images radar qui est leur incapacité à acquérir des images de nuit ou à travers un couvert nuageux. Par conséquent, la probabilité d'obtenir une image optique pendant les phases actives d'une crue - dans un laps de temps court autour du passage du pic de crue dans la plaine - est réduite.

9.2.3 Exigences pour l'application des méthodologies d'extraction d'une carte d'inondation certaine et d'estimation des niveaux d'eau à un nouveau site d'étude

Dans un souci de généralisation des méthodologies à de nouveaux sites d'étude, cette section discute les données et les exigences requises pour l'application des méthodologies de cartographie d'inondations et d'estimation des niveaux d'eau proposées aux chapitres 4 et 5.

Extraction d'une carte d'inondation certaine

La méthode de cartographie d'inondation est transposable a priori sur tout site d'étude, mais ne présente un intérêt certain que pour des plaines d'inondations relativement larges pour lesquelles les zones urbaines et de végétation haute sont raisonnablement étendues. Elle est relativement aisée et simple à mettre en œuvre.

Pour rappel, la méthode de cartographie proposée au Chapitre 4 repose sur un double seuillage de l'image radar, une suppression des sur-détections et un masquage des zones où des sous-détections sont susceptibles de se produire.

La détermination des valeurs de seuils radiométriques repose sur le calcul de valeurs représentatives des retrodiffusions de l'eau libre, de la forêt et de la prairie. Le traitement des sur-détections nécessite

de connaître les pente et azimut du terrain naturel pour identifier les zones où se produisent les phénomènes d'ombrage. Le masquage des zones où des sous-détections sont susceptibles de se produire nécessite des données d'occupation du sol fines pour cartographier les objets susceptibles de masquer l'eau (arbres, bâtiments, lignes électriques parallèles à l'orbite du satellite, poteaux électriques à haute tension ...).

L'occupation du sol doit être connue finement afin de représenter en particulier des groupes d'arbres ou des bâtiments isolés qui apparaissent émergés sur l'image radar mais qui ne sont pas nécessairement présents sur les données topographiques. Lorsque l'occupation du sol n'est pas connue finement dans une plaine donnée, elle peut être déterminée par photo-interprétation sur des images à très haute résolution spatiale. Pour le site d'étude Moselle, nous avons utilisé des photographies aériennes au 25000^{ème}. En perspective, les images satellitaires THRS acquises hors période de crue doivent permettre de cartographier finement les zones d'arbres, de bâtiments de façon relativement systématique, grâce à une multiplication actuelle des satellites THRS.

En conséquence, pour pouvoir extraire d'une image satellitaire radar une carte d'inondation certaine les données nécessaires sont :

- une image RADAR de crue,
- des données d'occupation du sol concernant les objets qui masquent l'eau, la prairie et les eaux permanentes,
- des données topographiques pour extraire les pente et azimut du terrain.

Extraction des segments informatifs et estimation des niveaux d'eau

La méthode d'estimation des niveaux d'eau est transposable pour des plaines d'inondation assez larges, avec des pentes assez faibles. De plus, il est nécessaire que les hauteurs d'eau présentes dans la plaine au moment d'acquisition de l'image satellitaire soient suffisantes compte tenu des incertitudes sur les estimations finales qui peuvent être attendues.

Pour rappel, la méthode d'estimation des niveaux d'eau repose sur un croisement des segments informatifs avec un MNT fin, la définition d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs et une mise en cohérence hydraulique. Les phases de croisement des segments informatifs avec un MNT et de mise en cohérence hydraulique sont automatisables.

L'extraction des segments informatifs nécessite de cartographier les eaux permanentes et les zones de forte variabilité altimétriques. Pour cela, les données nécessaires sont des images hors crue et des données topographiques fines. Les données topographiques doivent représenter les structures topographiques (talus, voies de communication surélevées). Pour le site d'étude de la Moselle, nous avons exploité des données topographiques issues de photogrammétrie sur des photographies aériennes. En perspective, les MNT LiDAR doivent pouvoir être acquis de façon relativement systématique sur un site d'étude et ainsi permettre de connaître de façon précise la topographie.

Dans le cas d'un écoulement supposé monodimensionnel, la hiérarchie hydraulique des segments informatifs peut être calculée de façon automatisée grâce à la position des estimations de niveau d'eau le long du lit mineur, ou grâce à la géométrie d'un modèle hydraulique 1D. Par contre, lorsque l'écoulement est supposé bidimensionnel, la définition d'une hiérarchie hydraulique impose une phase

d'expertise qui exploite des données exogènes. Pour mener à bien cette phase d'expertise, les données suivantes sont nécessaires :

- une image radar d'inondation,
- des données topographiques fines,
- des images à Très Haute Résolution Spatiale (Métrique à centimétrique)

En conséquence, de façon générale, les méthodologies d'extraction d'une carte d'inondation certaine et d'estimation des niveaux d'eau nécessitent une image radar de crue, des données topographiques fines, et des images THRS hors crue.

9.2.4 Vers une chaîne de traitement automatisée et opérationnelle

Rappelons qu'un des objectifs qui a motivé la thèse est le développement d'une chaîne de traitement opérationnelle d'une image satellitaire de crue permettant de calculer le devenir de l'inondation grâce à l'assimilation de cette image dans un modèle hydraulique de prévision. Dans ce contexte, la chaîne de traitement aurait pour objectif de permettre dans un premier temps le décodage d'une image satellitaire en étendue inondée certaine ou en niveaux d'eau, puis l'assimilation de l'une ou l'autre de ces informations dans un modèle hydraulique préalablement calé.

Vis à vis d'une telle chaîne de traitement automatisée, la thèse a apporté des méthodologies de décodage d'une images satellitaire de crue en étendue inondée et en niveaux d'eau et une méthodologie de calage d'un modèle hydraulique grâce à une image satellitaire de crue.

Pour parvenir à une chaîne complète, il serait nécessaire d'automatiser les méthodologies d'extraction des étendues inondées ou des niveaux d'eau et de les compléter par l'assimilation dans un modèle de prévision. Pour pouvoir envisager une telle chaîne de traitement, cette section vise à définir quelles sont les possibilités d'automatisation du décodage d'une image satellitaire de crue en étendue inondée certaine ou en niveaux d'eau.

Automatisation de l'extraction d'une carte d'inondation certaine

La méthode de cartographie proposée au Chapitre 4 repose sur un double seuillage de l'image radar, une suppression des sur-détections et un masquage des zones où des sous-détections sont susceptibles de se produire.

La détermination des valeurs de seuils radiométriques n'est a priori pas automatisable mais elle reste relativement aisée et rapide à mettre en oeuvre car elle est réalisable par plusieurs opérations de calcul de statistiques spatiales sous Système d'Information Géographique (peu gourmandes en temps de calcul et de manipulation de l'opérateur). Une fois le choix des seuils radiométriques effectué, le double seuillage et la suppression des sur-détections peuvent être automatisés.

Par contre, le masquage des zones où des sous-détections sont susceptibles de se produire, n'est pas toujours réalisable de façon automatique et rapide. En effet, l'automatisation de cette étape nécessite la création préalable d'un masque représentant zones. Or, en particulier en présence de jachères, la construction préalable de ce masque semble peu envisageable. Néanmoins, dans le cas où les éléments

qui masquent l'eau sont uniquement les arbres et les bâtiments, il est possible de cartographier ces zones préalablement et d'obtenir une carte d'inondation certaine rapidement.

Les informations préalables pour pouvoir automatiser l'extraction d'une carte d'inondation certaine sont alors :

- une image radar d'inondation,
- un masque représentant les arbres et les bâtiments

Automatisation de l'extraction des segments informatifs et de l'estimation des niveaux d'eau

La mise en place de la méthode d'estimation des niveaux d'eau nécessite la construction des segments informatifs qui correspondent aux parties des limites de la carte d'inondation certaine hors des zones à forte variabilité altimétrique et des zones d'eau permanentes. En conséquence, si ces zones ont été cartographiées au préalable, l'extraction des segments informatifs est automatisable.

Par ailleurs, comme indiqué précédemment, la méthode d'estimation des niveaux d'eau repose sur un croisement des segments informatifs avec un MNT fin, la définition d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs et une mise en cohérence hydraulique. Les phases de croisement des segments informatifs avec un MNT et de mise en cohérence hydraulique sont automatisables.

Dans le cas d'un écoulement supposé monodimensionnel, la hiérarchie hydraulique des segments informatifs peut être calculée de façon automatisée grâce à la position des estimations de niveau d'eau le long du lit mineur, ou grâce à la géométrie d'un modèle hydraulique 1D. En conséquence, avec une hypothèse d'écoulement monodimensionnel, l'automatisation de la méthode d'estimation des niveaux d'eau est possible car elle ne nécessite aucune intervention d'un opérateur, le schéma d'écoulement des eaux étant connu a priori.

Par contre, lorsque l'écoulement est supposé bidimensionnel, la définition d'une hiérarchie hydraulique impose une phase d'expertise. L'expertise hydraulique est relativement lourde à mettre en œuvre car elle suppose une interprétation des données de la part de l'opérateur et ne peut par conséquent être automatisée.

En conséquence, avec l'utilisation d'un modèle hydraulique 1D ou 1D-casier préalablement calé, les niveaux d'eau extraits d'images satellitaires pourraient être obtenus de façon automatisée, sous certaines conditions (évoquées précédemment), et servir de condition initiale permettant de « router » l'inondation observée à la date d'acquisition de l'image.

Pour cela, il serait nécessaire d'une part d'automatiser la méthode d'estimation des niveaux d'eau et d'autre part d'avoir à disposition, avant acquisition d'une image satellitaire, un masque niveau (zones non pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau), un MNT, et un modèle hydraulique calé, prêt à intégrer les estimations des niveaux d'eau satellitaires.

Une chaîne de traitement pourrait alors être mise en place (Figure 9.5), permettant de calculer le devenir d'une inondation dans les quelques jours suivant la date d'acquisition d'une image satellitaire. L'intégration des estimations des niveaux d'eau « satellitaires » comme condition initiale d'un modèle hydraulique de l'Alzette est par ailleurs prévue au Centre de Recherche Publique G. Lippmann (Luxembourg).

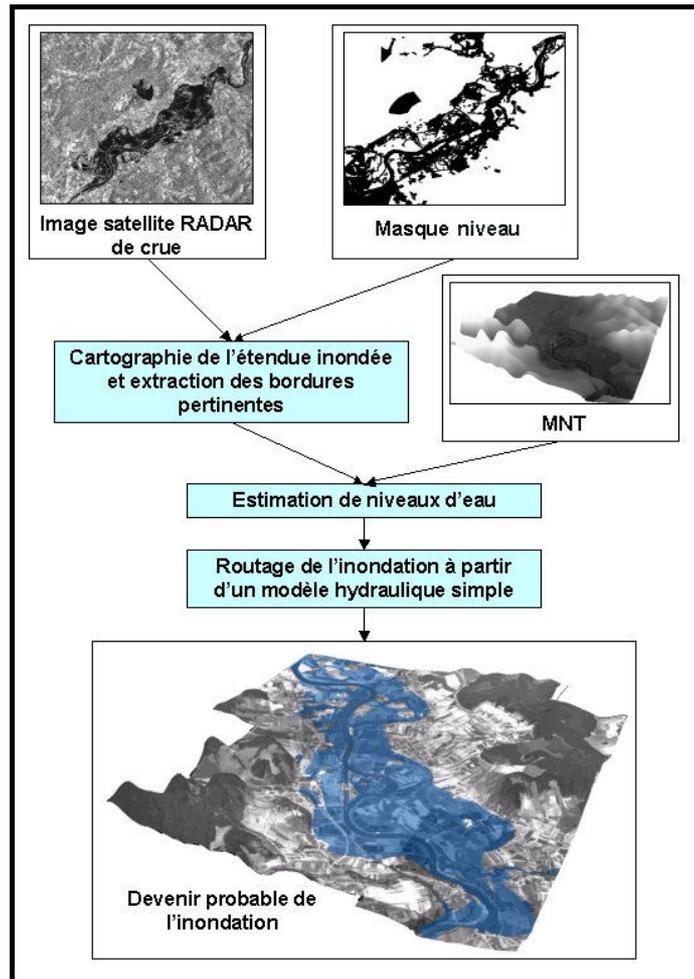


Figure 9.5 : Exemple de schéma d'une chaîne de traitement automatisée d'une image radar permettant le calcul du devenir probable de l'inondation.

9.2.5 Alternatives et perspectives des méthodologies

Une alternative à la méthode d'estimation des niveaux d'eau

A partir d'une image satellitaire radar, les travaux de (Schumann et al., 2006) ont montré qu'il est possible d'estimer des niveaux d'eau avec une précision tout à fait raisonnable (~20cm) grâce au développement d'une méthode appelée REFIX (Regression and Elevation based Flood Information eXtraction). Dans cette dernière, les profils en travers d'un modèle hydraulique sont croisés avec les étendues inondées à partir d'une image radar, afin d'obtenir les limites d'inondation sur chaque profil en travers. Croisées avec un MNT fin, les limites de l'inondation sur chaque profil en travers permettent d'estimer des valeurs possibles du niveau d'eau. Finalement pour ne retenir qu'une estimation de niveau par profil en travers, une régression linéaire est appliquée au nuage de points représentant les niveaux d'eau en fonction des abscisses curviligne des profils en travers sur le profil en long de la rivière. Cette méthode, appliquée au site de l'Alzette, fournit une précision d'estimation des niveaux d'eau de 18cm. Appliquée au cas de la Moselle lors d'une collaboration, cette méthode n'a permis d'obtenir des résultats satisfaisant vis à vis du modèle hydraulique calé qu'en supprimant

de l'analyse les zones de forêt et les zones urbaines. En comparaison à la méthode développée dans la thèse, le REFIX donne des précisions similaires aux estimations moyennes proposées dans le document. Par contre, elle est moins adaptée à la méthode GLUE car elle ne prend pas en compte les incertitudes sur les données radar et les données topographiques.

Vers la modélisation bidimensionnelle et l'assimilation variationnelle des estimations de niveaux d'eau dans un modèle hydraulique

Une autre voie de valorisation des estimations des niveaux d'eau issues d'images satellitaires radar est l'assimilation variationnelle. Cette technique, basée sur la théorie du contrôle optimal, recherche des valeurs optimales de paramètres d'un modèle en minimisant une fonction objectif représentative de l'écart entre simulé et observé (Honnorat et al., 2005). La minimisation est rendue possible grâce au développement d'un code de calcul, appelé code adjoint du modèle hydraulique, qui permet de connaître les dérivées partielles de la fonction objectif par rapport aux paramètres à optimiser (paramètres optimaux obtenus aux points d'annulation des dérivées partielles).

Dans ce contexte, les niveaux d'eau extraits des images satellitaires peuvent être une source adaptée de données observées pour le calcul de la fonction objectif.

L'assimilation variationnelle des estimations de niveau d'eau issues de l'image RADARSAT de la Moselle dans un modèle hydraulique 2D (Dassflow) est prévue à l'INRIA Grenoble (équipe MOISE).

Conclusion générale

La principale exploitation des images satellitaires de crues est à ce jour la cartographie d'inondations. En particulier, dans le cadre de la charte Espace et Catastrophe Majeures, des images satellitaires de crues sont traitées, en contexte opérationnel, pour fournir des cartes d'inondations utiles à la gestion des inondations en contexte de crise. Par ailleurs, d'autres travaux (Horritt, 2000; Pappenberger et al., 2005a; Smith et al., 1996) ont montré qu'une carte d'inondation n'est qu'une valorisation partielle d'une image satellitaire de crue. En particulier, il semble très intéressant de valoriser ces images par la quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau et l'aide à la modélisation hydraulique des inondations. En complément des « actions charte », il nous est apparu très utile d'évaluer les possibilités de développer d'une chaîne de traitement automatisée permettant le décodage d'une image satellitaire de crue en étendue inondée et/ou en niveaux d'eau, puis l'assimilation des ces caractéristiques spatiales dans un modèle hydraulique de prévision préalablement calé. Afin de fournir des avancées méthodologiques permettant de valoriser les images satellitaires et d'aller vers une chaîne de traitement opérationnelle, les questions de recherche auxquelles la thèse a souhaité répondre sont les suivantes :

- Comment quantifier la distribution spatiale des niveaux d'eau en plaine inondée à partir d'une image satellitaire de crue ?
- Comment intégrer des étendues inondées ou des estimations de niveaux d'eau issues d'une image satellitaire de crue dans un modèle hydraulique ?

Pour répondre à ces deux questions de recherche, une approche pluridisciplinaire a été adoptée, à l'intersection entre la télédétection satellitaire, l'analyse spatiale, et la modélisation hydraulique.

Caractérisation tridimensionnelle fine de l'aléa inondation

Les caractéristiques spatiales que nous avons souhaité extraire d'une image satellitaire et intégrer dans la modélisation hydraulique sont une carte d'inondation certaine, i.e. au sein de laquelle la présence ou l'absence d'eau est certaine, et des niveaux d'eau.

Pour obtenir une carte d'inondation certaine, la méthode de cartographie d'inondation a montré l'importance de s'affranchir des effets perturbateurs de certaines occupations du sol. Cela a pu être réalisé grâce à des travaux d'analyse et d'identification des erreurs potentielles dans les cartes d'inondations extraites d'images satellitaires qui sont principalement les zones d'arbres et de bâtiments.

Pour estimer des niveaux d'eau avec des précisions compatibles avec celles requises dans le cadre de la modélisation hydraulique, il a été dans un premier temps nécessaire d'éliminer de la carte d'inondation certaine les limites d'inondation qui ne sont pas pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau (eaux permanentes, zones à forte variabilité altimétrique). En effet, sans cet effort « d'épuration » de l'information radar, comme l'annonce (Lane et al., 2003), les informations de niveaux d'eau qu'il est possible d'extraire sont beaucoup trop incertaines pour des applications en hydraulique fluviale. Nous avons en particulier montré, pour le site d'étude de la Moselle, que les pixels les plus utiles pour l'estimation des niveaux d'eau ne constituent que 0,5% de la totalité de la carte d'inondation extraite de l'image radar.

Par ailleurs, la seule élimination des zones non pertinentes de la carte d'inondation « satellitaire » n'est pas le seul point déterminant dans la méthode d'estimation des niveaux d'eau. En effet, sans la mise en cohérence hydraulique, inspirée des travaux de (Raclot, 2003a), les estimations des niveaux d'eau

qu'il est possible d'obtenir ont des incertitudes qui ne permettent pas leur utilisation dans le cadre de la modélisation hydraulique. Grâce à la mise en cohérence hydraulique, les incertitudes obtenues sont plus faibles que dans des travaux similaires à partir d'images satellitaires : intervalle d'incertitude moyen de 0.76m pour la Moselle comparé à 1 à 3m pour (Brakenridge et al., 1998).

Par ailleurs, bien que les incertitudes sur les estimations des niveaux d'eau « satellites » restent fortes vis à vis de celles obtenues à partir de photographies aériennes (Raclot, 2003a) ou de mesures au sol, la télédétection spatiale a l'avantage de fournir des images d'emprises au sol importantes avec une continuité sur de longs linéaires de cours d'eau. Elle permet ainsi d'obtenir des estimations concomitantes sur de grandes étendues. De plus, compte tenu des difficultés de circulation au sol en période de crue, l'acquisition de mesures de niveau d'eau in situ avec des densités et sur des étendues comparables à celles présentées dans la thèse paraît impossible.

L'application de la méthode sur le site d'étude de la Moselle, considéré représentatif des inondations de plaines en Europe (Puech et al., 2002), donne à la méthode développée une dimension générale et laisse supposer qu'elle peut être appliquée sur un grand nombre de sites d'étude. Par exemple, une comparaison entre les valeurs médianes des intervalles d'estimation des niveaux d'eau « satellites » avec des mesures in situ sur l'Alzette (Luxembourg) a montré une précision tout à fait raisonnable, puisque la RMSE calculée est égale à 13cm.

Intégration des caractéristiques tridimensionnelles fines extraites d'images satellitaires dans les modèles hydrauliques

Pour répondre à la seconde problématique de recherche, les caractéristiques spatiales issues des images satellitaires ont été intégrées dans une procédure de calage d'un modèle hydraulique. Les résultats obtenus ont montré la capacité de ces caractéristiques à mieux contraindre le modèle, ce qui permet de supposer celui-ci plus fiable en prévision. Bien qu'aucune validation du modèle n'ait pu être effectuée, les valeurs du coefficient de frottement en lit mineur obtenues à l'issue du calage sont cohérentes avec des valeurs tabulées correspondant à la morphologie de la Moselle, ce qui autorise à supposer la méthode valable.

Un objectif complémentaire de la deuxième problématique de recherche était de développer une chaîne de traitement automatisée qui permette, en contexte opérationnel, de calculer le devenir probable d'une inondation après acquisition d'une image satellitaire. Bien que la chaîne de traitement n'ait pas été développée, les travaux ont montré sa faisabilité sur des sites d'études pour lesquels il est raisonnable d'utiliser un modèle hydraulique simple (monodimensionnel ou 1D-casier). En effet, avec une hypothèse d'écoulement 1D, la méthode d'estimation des niveaux d'eau est globalement automatisable, ce qui permet d'envisager le calcul de niveau d'eau à partir d'une image satellitaire et leur intégration comme condition initiale d'un modèle hydraulique 1D préalablement calé. L'intégration des niveaux d'eau issus d'images satellitaires dans un modèle hydraulique simple permettrait alors de router l'inondation « vue » par le satellite.

En conclusion, la thèse a permis d'une part de montrer qu'il est possible d'obtenir à partir d'une image satellitaire des estimations des niveaux d'eau avec des précisions suffisantes pour une application en hydraulique fluviale et d'autre part, que l'intégration de caractéristiques spatiales issues d'images satellitaires d'inondation permet de réduire le phénomène d'équifinalité dans une procédure de calage

d'un modèle hydraulique. La thèse a donc répondu favorablement à l'objectif de valorisation des images satellite pour l'estimation des niveaux d'eau et l'aide à la modélisation hydraulique.

En perspective, un point complémentaire qu'il semble nécessaire de noter est le développement croissant des satellites radar imageurs, avec en particulier les lancements de RADARSAT-2, ALOS, Cosmo-skymed, TerraSar-X, qui permettent d'espérer une acquisition d'images de crues plus systématique, offrant ainsi la possibilité d'accroître les bases de données inondation et les possibilités en terme d'assimilation et de calage des modèles hydrauliques. De plus, grâce à des résolutions spatiales plus fines (~3m pour RADARSAT-2) et des capteurs multipolarisation, il est possible d'envisager d'obtenir des cartes d'inondations et des estimations des niveaux d'eau plus précises et donc très utiles à la modélisation hydraulique. Le développement de ce types de satellites, en lien avec l'émergence MNT LiDAR et la disponibilité de plus en plus systématique d'images optique THRS devrait rendre possible l'application des méthodes présentées dans ce documents à de nouveaux sites d'étude.

Références bibliographiques

- Agence de l'eau Rhin-Meuse[@]Hydrographie du bassin Rhin Meuse, *site Internet*, <http://www.eau-rhin-meuse.fr/observatoire/bassin/hydrographie.htm>.
- Aires F., Prigent C. & Rossow W. B., 2005, Sensitivity of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale: Global statistical relationships, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Vol. 110 (D11).
- Ali A. & Qadir D. A., 1989, Study of river flood hydrology in Bangladesh with AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 47, pp. 1873-1891.
- Alsdorf D. E., J.M. M., Dunne T., Mertes L. A. K., Hess L. L. & Smith L. C., 2000, Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain, *Nature*, Vol. 47, pp. 174-177.
- Alsdorf D. E., Smith L. C. & J.M. M., 2001, Amazon Floodplain Water Level Changes Measured with Interferometric SIR-C Radar, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 39 (2), pp. 423-431.
- Alsdorf D. E., 2002, Interferometric SAR observations of water level changes: Potential targets for future repeat-pass AIRSAR missions, *Actes de colloque, AIRSAR Earth Science and Application Workshop*.
- Ancely C., 2005, Une introduction à la Dynamique des Avalanches et des Écoulements Torrentiels, *Cours*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, <http://www.toraval.fr/articlePDF/intro-risk.pdf>.
- Andreoli R. & Yésou H., 2005, Monitoring water level seasonal variations of large natural lake exploiting Envisat ASAR low resolution time series : Application to the Poyang Lake (P.R. China) during the 2004-2005 hydrological period, *Actes de colloque, 2005 Dragon Symposium "Mid Term Results"*. Santorini, Greece.
- Aronica G., Hankin B. & Beven K., 1998, Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data, *Advances in Water Resources*, Vol. 22 (4), pp. 349-365.
- Aronica G., Bates P. D. & Horrit M. S., 2002, Assessing the uncertainty in distributed model predictions using binary pattern information within GLUE, *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 2001-2016.
- Badji M. & Dautrebande S., 1997, Characterization of flood inundated areas and delineation of poor drainage soil using ERS-1 SAR imagery, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), pp. 1441-1450.
- Banque Hydro[@]Ministère de l'aménagement et du développement durable, *site Internet*, hydro.mde.tm.fr/.
- Bates P. D. & Anderson M. G., 1996, A preliminary investigation into the impact of initial conditions on flood inundation predictions using a time/space distributed sensitivity analysis, *CATENA*, Vol. 26 (1-2), pp. 115-134.
- Bates P. D., Horritt M. S., Smith C. N. & Mason D., 1997, Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (14), pp. 1777-1795.
- Bates P. D. & de Roo A. P. J., 2000, A simple raster-based model for flood inundation simulation, *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 54-77.
- Bates P. D., Marks K. J. & Horritt M. S., 2003, Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models, *Hydrological Processes*, Vol. 17 (3), pp. 537-557.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bercher N., Kosuth P. & Bruniquel J., 2006, Characterizing the quality of river water level time series derived from satellite altimetry: Efforts towards a standardized methodology, *Actes de colloque, Venice 2006 Symposium: "15 years of progress in radar altimetry"*, Venice.
- Berz G., 2000, Flood disasters: lessons from the past - worries for the future, *Actes de colloque, Water and Maritime Engineering, Proceedings of the institution of Civil Engineers*, Vol. 142.
- Beven K. & Binley A., 1992, The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction, *Hydrological Processes*, Vol. 6 (3), pp. 279-298.
- Beven K., 1993, Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling, *Advances in Water Resources*, Vol. 16 (1), pp. 41-51.
- Beven K., 2006, A manifesto for the equifinality thesis, *Journal of Hydrology, The model parameter estimation experiment - MOPEX*, Vol. 320 (1-2), pp. 18-36.
- Beven K. J., 2001, How far can we go in distributed hydrological modelling?, *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 5 (1), pp. 1-12.
- Birkett C. M., 1994, Radar altimetry: a new concept in monitoring global lake level changes, *EOS (American Geophysical Union Transactions -American Geophysical Union)*, Vol. 47, pp. 273-275.
- Birkett C. M., 1998, Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands, *Water Resources Research*, Vol. 47, pp. 1223-1239.
- Birkett C. M., 2000, Synergistic remote sensing of Lake Chad: variability of basin inundation, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 47, pp. 218-236.
- Blöschl G. & Silvapan M., 1995, Scale issues in hydrological modelling : a review, *Hydrological Processes*, Vol. 9, pp. 251-290.
- Blyth K., 1997, FLOODNET: A telenetwork for acquisition, processing and dissemination of earth observation data for monitoring and emergency management of floods, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), pp. 1359-1375.
- Bonn F. & Rochon G., 1993, Précis de Télédétection - Vol.1 Principes et méthodes, 485.
- Borgeaud M. & Wegmueller U., 1996, On the Use of ERS SAR Interferometry for the Retrieval of Geo- and Bio-Physical Information, *Actes de colloque, FRINGE 96 :ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry*, University of Zurich, Switzerland.
- Brakenridge G. R., Tracy B. T. & Knox J. C., 1998, Orbital SAR remote sensing of a river flood wave, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19 (7), pp. 1439-1445.
- Brivio P. A., Colombo R., Maggi M. & Tomasoni R., 2002, Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 (3), pp. 429-441.
- Bruniquel J. & Lopes A., 1997, Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18 (3), pp. 603-627.
- Bukata R. P., Jerome J. H., Kondratyev K. Y. & Pozdniakov D. V., 1995, Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters, *Livre*, 362 p.
- Castaigns W., Le Dimet F.-X. & Dartus D., 2003, Assimilation de données en hydrologie, *Société française de photogrammétrie*.
- CCT@Centre Canadien de Télédétection, *site Internet*, <http://ccrs.nrcan.gc.ca/>.
- CETMEF, 2001, Hydraulique des cours d'eau : la théorie et sa mise en pratique, *Livre*.
- Charleux-Demargne J., 2001, Qualité des modèles numériques de Terrain pour l'hydrologie : Application à la caractérisation du régime de crue des bassins versants, *Thèse de doctorat*, Université de Marne-la-vallée, UMR structure et systèmes spatiaux, Cemagref-ENGREF, 275 p. + annexes.

- CIPMS[@]Commissions Internationnales pour la Protection de la Moselle et de la Sarre, *site Internet*, <http://213.139.159.34/servlet/is/1553/>.
- Clandillon S. & De Fraipont P., 2000, Environmental risks within natural areas; the Ill River's flood plain, Alsace, France - Water quality and flooding, *Surveys in Geophysics*, Vol. 21 (2-3), pp. 223-228.
- CNES[@], 2000, Introduction to remotely sensed data, B. A. Harrison and D. L. B. Jupp, *site Internet*, <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/irsd/content.htm>.
- Cobby D. M., Mason D. C. & Davenport I. J., 2001, Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling, *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 56, pp. 121-138.
- Colby J. D., Mulcahy K. A. & Wang Y., 2000, Modeling flooding extend from Hurrican Floyd in the costal plains of north Carolina, *Environmental Hazards*, Vol. 2, pp. 157-168.
- Comblet F., 2005, Détection, localisation et identification de cibles radar par imagerie électromagnétique bistatique, *Thèse de doctorat*, spécialité Science de la Matière, de l'Information et de la Santé, Univertsité de Bretagne Occidentale.
- Conseil Régional de Lorraine[@]Le climat Lorrain, *site Internet*, <http://www.crlorraine.fr/crlorraine/sites/crlorraine/fr/lalorraine/geographie/leclimat>.
- Cudlip W., Ridley J. K. & apley C. G., 1990, The use of satellite radar altimetry for monitoring wetlands, *Remote Sensing and Global Change*, pp. 207-216.
- Davis F. W. & Simonett D. S., 1991, GIS and remote sensing, *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, pp. 191-213.
- de F. Costa M. P., de Moraes E. M. L., Ahern F., Mitsuo II F., Mantovani J. E., Ballester M. V. & Pietsch R. W., 1998, The Amazon Floodplain Trough RADAR Eyes: Lago Grande de Monte Alegre Case Study, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 24 (4), pp. 339-349.
- De Roo A., Van Der Kniff J., Schmuck G. & Bates P., 2000, A simple floodplain inundation model to assist in floodplain management.
- De Roo A. P. J., Van Der Knijff J., Horrit M. S., Schmuck G. & De Jong S., 1999, Assessing flood damages of the 1997 Oder flood and the 1995 Meuse Flood, *Actes de colloque, 2nd International Symposium on operationalization of Remote Sensing*, Enschede, The Netherlands.
- Delmeire S., 1997, Use of ERS-1 data for the extraction of flooded areas, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), pp. 1393-1396.
- Deneau D., 2002, Extracting 3D Coastlines from Remotely Sensed Data, *Rapport*, Center of Geographic Sciences, Lawrencetown, 71 p.
- Dhakai A. S., Amada T., Anyia M. & Sharma R. R., 2002, Detection of areas associated with flood and erosion caused by a heavy rainfall using multitemporal Landsat TM data, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 68, pp. 233-240.
- DIREN Lorraine[@]Direction Régionale de l'ENvironnement, *site Internet*, <http://www.lorraine.ecologie.gouv.fr/>.
- Disasters Charter[@], *site Internet*, http://www.disasterscharter.org/main_f.html.
- Dupont S., 1997, Génération de modèles numériques de terrains par interférométrie ROS, *Thèse de doctorat*, spécialité Sciences de l'ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, INRIA, 143 p. + annexes.
- EPAMA[@]Etablissement Publique d'Aménagement de la Meuse et de ses Affluents, *site Internet*.
- ESA, 2000, "Looking down to Earth for the New Millenium", *Actes de colloque, Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium*, Gothenbourg.
- ESRI, 2005, Arcgis Desktop Manual.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Fellah K., 1997, Mesure des paramètres des sols à partir de données des satellites RADAR pour les applications hydrologiques, *Thèse de doctorat*, spécialité Mention Doctorat Européen, Louis Pasteur.
- Fouchier C., Lavabre J., Royet P. & Félix H., 2004, Inondations de septembre 2002 dans le sud de la France : analyse hydrologique et hydraulique au niveau des barrages écrêteurs du Vidourle, *Ingénierie*, Vol. 37, pp. 23-35.
- Franks S. W., Beven K. J., Quinn P. F. & Wright I. R., 1997, On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 86 (1-2), pp. 63-75.
- Freer J. E., McMillan H., McDonnell J. J. & Beven K. J., 2004, Constraining dynamic TOPMODEL responses for imprecise water table information using fuzzy rule based performance measures, *Journal of Hydrology*, Vol. 291 (3-4), pp. 254-277.
- Frost V., Stiles J. & Holtzman J., 1982, A model for RADAR images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 4 (2), pp. 156-166.
- Garrote L. & Bras R. L., 1995, A distributed model for real time flood forecasting using digital elevation models, *Journal of Hydrology*, Vol. 167, pp. 279-306.
- Giacomelli A., Mancini M. & Rosso R., 1995, Assesment of flooded areas from ERS-1 PRI data: An application to the 1994 flood in Northern Italy, *Physics and Chemistry of The Earth*, Vol. 20 (5-6), pp. 469-474.
- Gilard O. & Gendreau N., 1998, Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants, *Revue Sciences de l'Eau*, Vol. 11 (3), pp. 429-444.
- Gineste P., 1998, Contribution de l'imagerie satellitale RADAR ERS1 à la télédétection des zones saturées et à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant agricole par TOP MODEL, *Thèse de doctorat*, spécialité Sciences de l'eau, ENGREF, UMR structure et systèmes spatiaux, Cemagref-ENGREF.
- Girard M. C. & Girard C. M., 1999, Traitement des données en télédétection, *Livre*, Dunod, Paris, 529 p.
- Gitelson A. A., Dubovitzkii G. A. & Mittenzwey K. H., 1990, Fundamental experiments for the laser remote sensing of inland waters, *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, Vol. 47, pp. 537-546.
- Gresillon J. M., 2004, Inondations, Aléa et enjeux au regard du changement climatique, *Actes de colloque, Colloque ONERC, Collectivités locales et changement climatique : quelles stratégies d'adaptation ?*, Paris.
- Gumley L. E. & King M. D., 1995, Remote-Sensing of Flooding in the US Upper Midwest During the Summer of 1993, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 76 (6), pp. 933-943.
- Guo H., 2000, Spaceborne and airborne SAR for Target detection and flood monitoring, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 66 (Geospatial technology in China), pp. 611-618.
- Gupta R. P. & Banerji S., 1995, Monitoring of reservoir volume using Landsat Data, *Journal of hydrology*, Vol. 77, pp. 159-170.
- Harding D. J. & Jasinski M. F., 2004, ICESat Observations of Inland Surface Water Stage, Slope, and Extent: a new Method for Hydrologic Monitoring, *Actes de colloque, American Geophysical Union, Fall Meeting 2004*, Vol. 85(47).
- Henry J.-B., 2004, Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, *Thèse de doctorat*, spécialité Géographie physique, Université de Strasbourg I, SERTIT.

- Hess L. L., Melack J. M. & Simonett D. S., 1990, Radar detection of flooding beneath the forest canopy -a review, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 47, pp. 1313-1325.
- Hess L. L., Melack J. M., Filoso S. & Wang Y., 1995, Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, pp. 896-904.
- Holah N., 2005, Potentiel des nouveaux capteurs radar multipolarisation et polarimétrie pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole, *Thèse de doctorat*, spécialité Sciences de l'Univers, UNIVERSITE D'ORLEANS, 247 p. + annexes.
- Honorat M., Le Dimet F.-X., Loukili Y. & Monnier J., 2005, Dassow : Un modèle direct et inverse d'écoulements Saint-Venant 2D, *Rapport*, INRIA, 24 p.
- Hornberger G. M. & Spear R. C., 1981, An approach to the preliminary analysis of environmental systems, *Journal of Environmental Systems*, Vol. 12, pp. 7-18.
- Horritt M. S., 1999, A statistical active contour model for SAR image segmentation., *Image and Vision Computing*, Vol. 17, pp. 213-224.
- Horritt M. S., 2000, Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery, *Water Resources Research*, Vol. 36 (11), pp. 3279-3291.
- Horritt M. S., Mason D. C. & Luckman A. J., 2001, Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model., *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (13), pp. 2489-2507.
- Horritt M. S. & Bates P. D., 2001, Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach, *Hydrological Processes*, Vol. 15 (5), pp. 825-842.
- Horritt M. S. & Bates P. D., 2002, Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation., *Journal of Hydrology*, Vol. 268 (1-4), pp. 87-99.
- Horritt M. S., 2002, Stochastic modelling of 1-D shallow water flows over uncertain topography, *Journal of Computational Physics*, Vol. 180 (1), pp. 327-338.
- Horritt M. S., Mason D. C., Cobby D. M., Davenport I. J. & Bates P. D., 2003, Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery., *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 271-281.
- Horritt M. S., 2006, A methodology for the validation of uncertain flood inundation models, *Journal of Hydrology*, Vol. 326 (1-4), pp. 153-165.
- Hostache R., Puech C. & Raclot D., 2005, Caractérisation spatiale d'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR, *Actes de colloque, Colloque international SAGEO 2005*, Avignon, France, pp. 12 pages.
- Hostache R. & Puech C., In press, Estimation de niveaux d'eau en plaine inondée à partir d'images satellites RADAR et de données topographiques fines, *revue Télédétection*.
- Hudson P. F. & Colditz R. R., 2003, Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Panuco basin, Mexico, *Journal of Hydrology*, Vol. 280 (1-4), pp. 229-245.
- Imhoff M. L., Vermillion C., Story M. H., Choudhury A. M., Gafoor A. & Polcyn F., 1987, Monsoon flood boundary delineation and damage assessment using space borne imaging radar and Landsat data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 47, pp. 405-413.
- Ip F., Dohm J. M., Baker V. R., Doggett T., Davies A. G., Castano R., Chien S., Cichy B., Greeley R., Sherwood R., Tran D. & Rabideau G., 2006, Flood detection and monitoring with the autonomous sciencecraft experiment onboard EO-1, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 101 (4), pp. 463-481.
- Islam M. & Sado K., 2000, Flood hazard assessment in Bangladesh using NOAA AVHRR data with geographical information system, *Hydrological Processes*, Vol. 14 (3), pp. 605-620.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Islam M. D. M. & Sado K., 2000, Development of flood hazard maps of Bangladesh using NOAA-AVHRR images with GIS, *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, Vol. 45 (3), pp. 337-355.
- ITC@Department of GeoInformatics, WHB, *site Internet*, www.itc.nl/~bakker/sar.html.
- Jain S. K., Singh R. D., Jain M. K. & Lohani A. K., 2005, Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques, *Water Resources Management*, Vol. 19 (4), pp. 333-347.
- Jensen J. R., 1999, Remote sensing of water, *Remote Sensing Applications*, pp. 379-406.
- Jingfeng X., Jing L. & Moody A., 2003, A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24 (12), pp. 2451-2465.
- Joveniaux S., 1986, Etude et suivi des crues : utilisation de la télédétection spatiale., *Rapport*, Institut de Mécanique des fluides de Strasbourg.
- Kreis N., 2004, Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque inondation : Application à la vallée de Thur (Haut-Rhin), *Thèse de doctorat*, spécialité Science de l'eau, ENGREF, CEVH/ENGEES, 268 p. + annexes.
- Kruus J., Deutsch M., Hansen P. L. & Ferguson H. L., 1979, Flood applications of satellite imagery, *Actes de colloque, Satellite Hydrology, Fifth Ann. William T. Pecora Memorial Symp. on Remote Sens*, pp. 292-301.
- Lane S. N., 1998, Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology: A review of high resolution approaches, *Hydrological Processes*, Vol. 12 (8), pp. 1131-1150.
- Lane S. N., James T. D., Pritchard H. & Saunders M., 2003, Photogrammetric and laser altimetric reconstruction of water levels for extreme flood event analysis, *Photogrammetric Record*, Vol. 18 (104), pp. 293-307.
- Lee J., 1980, Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Li J., Yésou H., Huang S., Li J., Li X., XIN J., Wang X. & Andreoli R., 2005, Envisat ASAR medium and high resolution images for near real time flood monitoring in china during the 2005 flood season., *Actes de colloque, 2005 Dragon Symposium "Mid Term Results"*. Santorini, Greece.
- Liu X., Shulin Z. & Xianglian L., 1983, The application of Landsat imagery in the surveying of water resources of Dongting Lake, *Actes de colloque, IAHS, Hamburg Symposium*, Vol. 145, pp. 483-489.
- Liu Y. B. & De Smedt F., 2005, Flood modeling for complex terrain using GIS and remote sensed information, *Water Resources Management*, Vol. 19 (5), pp. 605-624.
- Liu Z., Huang F., Li L. & Wan E., 2002, Dynamic monitoring and damage evaluation of flood in north-west Jilin with remote sensing, *International Journal Of Remote Sensing*, Vol. 23 (18), pp. 3669-3679.
- Lopes A., Touzy R. & Nezry E., 1990, Adaptive speckle filters and scene heterogeneity, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 28 (6), pp. 992 - 1000.
- Lopes A., Nezry E., Touzy R. & Laur H., 1993, Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images, *International Journal Of Remote Sensing*, Vol. 14 (9), pp. 535 - 544.
- Ludwig R. & Schneider P., 2006, Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. In Press, Corrected Proof.
- Manche Y., 2000, Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels, *Thèse de doctorat*, spécialité Géographie, Université J. Fourier, Cemagref – Unité de Recherches Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche –, 175 p. + annexes.

- Mansourpour M., Rajabi M. A. & Blais J. A. R., 2006, Effects and Performance of Speckle Noise Reduction Filters on SAR Imageries, *Actes de colloque, Topographic Mapping from Space, ISPRS Ankara Workshop*, Ankara, Turkey.
- Martinez-Vilalta J., Pinol J. & Beven K., 2002, A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean, *Ecological Modelling*, Vol. 155 (2-3), pp. 127-147.
- Matgen P. & Pfister L., 2004, Incertitudes liées au calage d'un modèle de propagation de crue à l'aide de limites d'inondation issues de l'imagerie radar, *Actes de colloque, Séminaire REGLIS*, Montpellier.
- Matgen P., Henry J.-B., Pappenberger F., de Fraipon P., Hoffman L. & Pfister L., 2004, Uncertainty in calibrating flood propagation models with flood boundaries derived from Synthetic Aperture RADAR imagery, *Actes de colloque, 20th Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, Turkey, pp. 352-358.
- Maurel P., 1988, Cartographie et inventaire de plans d'eau à partir d'images SPOT, Rapport final, *Rapport*, Cemagref.
- Maurel P., 2001, Bases de la télédétection, *Cours*, DEA SEEC.
- MEDD Ministère de l'écologie et du développement durable, *site Internet*, <http://www.ecologie.gouv.fr>.
- MEDD-PRIM[®] Portail de la prévention des risques majeurs, Ministère de l'écologie et du développement durable, *site Internet*, <http://www.prim.net/>.
- Météo France[®] Le climat par département, *site Internet*, <http://www.meteofrance.com/FR/climat/>.
- Miller S. T., 1986, The quantification of floodplain inundation by the use of Landsat and metric camera information, Belize, Central America, *Actes de colloque, ISPRS 7th international symposium*, Enschede, pp. 733-736.
- Moore G. K. & North G. W., 1974, Flood inundation in the southeastern United States from aircraft and satellite imagery, *Water Resources Bulletin*, Vol. 47, pp. 1082-1096.
- Moore R. K. & Fung A. K., 1979, RADAR Determination of Winds at Sea, *Actes de colloque, IEEE*, Vol. 67, pp. 1504-1521.
- Moussa M. & Laranier R., 2004, Apport des systèmes d'information géographique et de la télédétection à l'analyse du risque d'inondation dans la ville de Saint-Louis du Sénégal, *Actes de colloque, Géorisques et télédétection*, Ottawa, Canada, pp. 139-141.
- Nash J. E. & Sutcliffe J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles., *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- NOAH, 2000, New oportunities of altimetry in hydrology. final report., *Rapport*, 319 p + annexes. p.
- Oberlin G., Gautier J.-N., Chastan B., Farissier P. & Givone P., 1993, Une méthode globale pour la gestion rationnelle des zones inondables : le programme « Inondabilité » du CEMAGREF, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 4 (3), pp. 171-176.
- Oberstadler R., Hönsch H. & Huth D., 1997, Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping: a case study in Germany, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), pp. 1415-1425.
- Observatoire Hydro-Climatologique du Grand Duché du Luxembourg, 2004, Centre de Recherche Publique Gabriel Lippmann, *site Internet*, <http://www.hydroclimato.lu/>.
- Overton I. C., 2005, Modelling floodplain inundation on a regulated river: Integrating GIS, remote sensing and hydrological models, *River Research and Applications*, Vol. 21 (9), pp. 991-1001.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Pappenberger F., Matgen P., Beven K., Henry J.-B., Pfister L. & de Fraipon P., 2005a, Influence of uncertainty boundary conditions and model structure on flood inundation predictions, *Advance in Water Ressources*.
- Pappenberger F., Beven K., Horritt M. & Blazkova S., 2005b, Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations, *Journal of Hydrology*, Vol. 302 (1-4), pp. 46-69.
- Pappenberger F., Iorgulescu I. & Beven K. J., 2006, Sensitivity analysis based on regional splits and regression trees (SARS-RT), *Environmental Modelling & Software*, Vol. 21 (7), pp. 976-990.
- Paquerault S. & Maitre H., 1997, La radarclinométrie, *Bulletin de la SFPT*, Vol. 148, pp. 20-29.
- Pelletier J. D., Mayer L., Pearthree P. A., House P. K., Demsey K. A., Klawon J. E. & Vincent K. R., 2005, An integrated approach to flood hazard assessment on alluvial fans using numerical modeling, field mapping, and remote sensing, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 117 (9-10), pp. 1167-1180.
- Pfister L., 2000, Analyse spatio-temporelle du fonctionnement hydro-climatologique du bassin-versant de l'Alzette (Grand-Duché de Luxembourg). Détection des facteurs climatiques, anthropiques et physiogéographiques générateurs de crues et d'inondations, *Thèse de doctorat*, Université Louis Pasteur et Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, 240 p. + annexes.
- Polidori L., 1997, Cartographie radar, *Livre*, Gordon and Breach science publishers, 289 p.
- Profeti G. & MacIntosh H., 1997, Flood management through Landsat TM and ERS SAR data: A case study, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), pp. 1397-1408.
- Puech C., 1992, Evaluation des capacités d'exploitation des plans d'eau sahéliens par imagerie SPOT, *Actes de colloque, VIIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, pp. 195-202.
- Puech C., 1993, Détermination des états de surfaces par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants, *Thèse de doctorat*, spécialité Mécanique, Université J. Fourier, Laboratoire commun de télédétection, 210 p. + annexes.
- Puech C., 1994, Plans d'eau sahéliens et imagerie SPOT : inventaire et évaluation des capacités d'exploitation., *Actes de colloque, Colloque international "Eau, environnement et développement" IMRS/IRIM.*, Nouackchott, pp. 68-83.
- Puech C. & Vidal A., 1995, *Actes de colloque, CEMAGREF-FAO expert consultation on the Use of Remote Sensing Techniques in Irrigation and Drainage, FAO water reports, 4*, Montpellier, pp. 151-154.
- Puech C., Doumerc F. & Lieutaud A., 1995, Identification des objets selon l'échelle : apport des outils de SIG, *Bulletin de la SFPT*, Vol. 140, pp. 18-19.
- Puech C., 2000, Mémoire de recherche : Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance des hydrosystèmes, *Habilitation à Diriger les Recherches*.
- Puech C., Galea G. & Faure J. B., 2002, Projet PACTES, Prévention et Anticipation des Crues à l'aide des Techniques Spatiales., *Rapport*, Ministère de la Recherche. Synthèse de la contribution du Cemagref.
- Puech C. & Raclot D., 2002, Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods, *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 1593–1602.
- Puech C., Raclot D. & Maurel P., 2003, Intérêt des images à très haute résolution spatiale pour évaluer le risque d'inondation, *Ingénierie*, pp. 83-96.
- Puech C. & Bailly J.-S., 2003, Risques d'inondation et modélisation hydrologique : pièges de l'assimilation de paramètres issus de données spatiales, *Actes de colloque, SIRNAT*, Orléans.
- Puech C., Bailly J. S., Raclot D., HOSTACHE R. & LAVABRE J., 2004, Utilisation des données d'observation de la terre pour l'étude des " Chemins de l'eau " et leur introduction dans l'analyse

- des inondations, projet R&T CNES, Dossier d'Axe de Recherche DU501, Gestion des risques d'Inondation, *Rapport*, Cemagref.
- Raclot D., 2003a, Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine, *Thèse de doctorat*, spécialité Sciences de l'eau, Montpellier II : Sciences et techniques du Languedoc, UMR structure et systèmes spatiaux, Cemagref-ENGREF, 284 p. + annexes.
- Raclot D., 2003b, Télédétection des niveaux d'eau en plaine inondée. Démarche d'analyse spatiale guidée par le fonctionnement hydraulique, *Bulletin de la SFPT*, Vol. n°172.
- Raclot D. & Puech C., 2003, What does AI contribute to hydrology? Aerial photos and flood levels, *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 17 (1), pp. 71-86.
- RADARSAT, 2000, RADARSAT : Data Products Specifications, *Rapport*.
- Rango A. & Anderson A. T., 1974, Flood hazard studies in the Mississippi River basin using remote sensing, *Water Resources Bulletin*, Vol. 47, pp. 1060-1081.
- Rao R. S., 1994, Role of Remote-Sensing in Flood Management - the May 1990 Cyclone, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15 (8), pp. 1557-1558.
- RAPPEL[®] Regroupement des associations pour la protection de l'environnement des lacs et des cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la rivière Saint-François, *site Internet*, <http://www.rappel.qc.ca/EAbassins.html>.
- REFER[®] Analyse en composantes principales d'une image multispectrale de télédétection, R. Solofoarisoa, *site Internet*, http://www.refer.mg/madag_ct/rec/madageo/num2/analyse.htm.
- Républicain Lorrain, 27/02/1997, Edition de Thionville, La Moselle devrait passer la cote d'alerte ce matin, *Article de presse*.
- Républicain Lorrain, 28/02/1997, Edition de Thionville, La décrue de la Moselle est amorcée mais des routes restent coupées, *Article de presse*.
- Rignot E. J. M., 1993, Change detection techniques for ERS-1 SAR data, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 21 (4), pp. 898-906.
- Ritchie J. C., Grissinger E. H. & J.B. M., 1994, Measuring channel and gully cross-sections with an airborne laser altimeter, *Hydrological Processes*, Vol. 47, pp. 237-243.
- Robin, 2000, Analyse du risque d'inondation à partir de données satellitales SPOT - Application à la crue de la seille en mars 1999, *Rapport*, ENGEES - ULP Strasbourg-Cemagref, Strasbourg, 97 p.
- ROCHE M., 1963, Hydrologie de surface, *Livre*, Orstom et Gauthier-Villars ed., Paris.
- Roux H., Raclot D. & Dartus D., 2003, Méthodes d'assimilation de données d'observation de la Terre appliquées à la reconstitution de paramètres hydrauliques, *SFPT*.
- Roux H., 2004, Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne, *Thèse de doctorat*, spécialité Science de la terre et environnement, INP Toulouse, IMFT.
- Roux H. & Dartus D., 2006, Use of parameter optimization to estimate a flood wave: Potential applications to remote sensing of rivers, *Journal of Hydrology*, Vol. 328 (1-2), pp. 258-266.
- RSI, 2000, RADARSAT Data Products Specifications, *Rapport*, RadarSat International, 125 p.
- Ryu J. H., Won J. S. & Min K. D., 2002, Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat - A case study in Gomsu Bay, Korea, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83 (3), pp. 442-456.
- Saad A. & El Assad S., 1985, Filtrage d'ordre vectoriel adaptatif du speckle dans les images ROS polarimétriques, *I-REVUE INIST*.
- Sanders R. & Tabuchi S., 2000, Decision support system for flood risk analysis for the river Thames, United Kingdom, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 66 (10), pp. 1185.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sanyal J. & Lu X. X., 2005, Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India, *Hydrological Processes*, Vol. 19 (18), pp. 3699-3716.
- Sassier H., Bruniquel J., Freissinet C., Chust G., Ducrot D. & Vauclin M., 2000, Use of SAR products for hydrological end-to-end application, *Actes de colloque, ERS/ENVISAT Symposium*.
- Schmugge T., 1987, Remote sensing applications in hydrology, *Review of Geophysics*, Vol. 47, pp. 148-152.
- Schultz G. A. & Engman E. T., 2000, Remote Sensing in Hydrology and Water Management, *Livre*, 483 p.
- Schumann G., Hostache R., Hoffmann L., Matgen P., Pappenberger F., Pfister L. & Puech C., 2006, High-resolution 3D flood information from radar imagery for efficient flood management, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Schutz B. E., Zwally H. J., Shuman C. A., Hancock D. & DiMarzio J. P., 2005, Overview of the ICESat Mission, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Vol. 32.
- Shaikh M., Green D. & Cross H., 2001, A remote sensing approach to determine environmental flows for wetlands of the Lower Darling River, New South Wales, Australia, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (9), pp. 1737-1751.
- Sharma P. K., Chopra R., Verma V. K. & Thomas A., 1996, Flood management using remote sensing technology: The Punjab (India) experience, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17 (17), pp. 3511-3521.
- Sippel S. J., Hamilton S. K., Melack J. M. & E.M.M. N., 1998, Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 47, pp. 3055-3074.
- Small D., Holecz F., Meier E., Nüech D. & Barmettler A., 1997, Geometric and Radiometric calibration of RADARSAT images, *Actes de colloque, Geomatics in the ERA of RADARSAT*, Ottawa Canada.
- Smith L. C., Isacks B., R.R. F., Bloom A. L. & Preuss I., 1995, Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS1 SAR: first results, *Water Resources Research*, Vol. 31, pp. 1325-1329.
- Smith L. C., Isacks B., Bloom A. L. & Murray A. B., 1996, Estimation of discharge from three braided rivers using Synthetic Aperture RADAR (SAR) satellite imagery: potential for application to ungaged basins, *Water Resources Research*, Vol. 32 (7), pp. 2021-2034.
- Smith L. C., 1997, Satellite remote sensing of river inundation area, stage and discharge : a review, *Hydrological processes*, Vol. 11, pp. 1427-1439.
- Tholey N., Clandillon S. & DeFraipont P., 1997, The contribution of spaceborne SAR and optical data in monitoring flood events: Examples in northern and southern France, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), pp. 1409-1413.
- Torterotot J. P., 1993, Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes, *Thèse de doctorat, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 284 p. + annexes.
- Townsend P. A. & Walsch S. J., 1998, Modeling flood plain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing, *Geomorphology*, Vol. 21, pp. 295-312.
- Townsend P. A., 2001, Mapping seasonal flooding in forested wetlands using multi-temporal radarsat SAR, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 67, pp. 857.
- Töyrä J., Pietroniro A. & Martz L. W., 2001, Multisensor hydrologic assessment of a freshwater wetland., *Remote Sensing of Environment* (75), pp. 162-173.

- Töyrä J. & Pietroniro A., 2005, Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97 (2), pp. 174-191.
- Tralli D. M., Blom R. G., Zlotnicki V., Donnellan A. & Evans D. L., 2005, Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards, *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59 (4), pp. 185-198.
- Ulaby F. T., Moore R. K. & Fung A. K., 1981, Microwave remote sensing active and passive : vol.I : Microwave remote sensing, fundamentals and radiometry, *Livre*, Artech House (GBR).
- Ulaby F. T., Moore R. K. & Fung A. K., 1982, Microwave remote sensing active and passive : vol.II : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory, *Livre*, Artech House (GBR).
- Ulaby F. T., Moore R. K. & Fung A. K., 1986, Microwave remote sensing active and passive : vol.III : From theory to applications, *Livre*, Artech House (GBR).
- Ulaby F. T. & Dobson M. C., 1989, Handbook of radar scattering statistics for terrain, *Livre*, 357 p.
- Ulaby F. T., Dubois P. C. & van Zyl J., 1996, Radar mapping of surface soil moisture, *Journal of Hydrology*, Vol. 184 (1-2), pp. 57-84.
- USACE, 2005a, HEC RAS Hydraulic Reference Manual.
- USACE, 2005b, HEC RAS User's Manual.
- Usachev V. F., 1983, Evaluation of flood plain inundations by remote sensing methods, *Actes de colloque, IAHS, Hamburg Symposium*, Vol. 145, pp. 475-482.
- USGS[®]Manning n reference online: Verified Roughness Characteristics of Natural Channels, *site Internet*, <http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm>.
- Vidal J.-P., 2005, Validation opérationnelle en hydraulique fluviale - Approche par un système à base de connaissance, *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, HHLY-Cemagref, 303 p. + annexes.
- Wang Q., Watanabe M., Hayashi S. & Murakami S., 2003, Using NOAA AVHRR data to assess flood damage in China, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 82 (2), pp. 119-148.
- Wang Y., Colby J. D. & Mulcahy K. A., 2002, An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 (18), pp. 3681-3696.
- Weber J. & Menéndez A., 2004, Performance of lateral velocity distribution models for compound channel sections., *Actes de colloque, River Flow 2004, Second International conference on Fluvial Hydraulics*, Naples, Vol. 1, pp. 449-457.
- Werner M. G. F., Hunter N. M. & Bates P. D., 2005, Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation, *Journal of Hydrology*, Vol. 314 (1-4), pp. 139-157.
- Whitehead P. G. & Young P. C., 1979, Water quality in river systems: Monte carlo analysis, *Water Ressource Research*, Vol. 15, pp. 451-459.
- Williamson A. N., 1974, Mississippi River flood maps from ERTS-1 digital data, *Water Resources Bulletin*, Vol. 47, pp. 1050-1059.
- Xu M., Li J., Huang S., Li L., Sun T. & Li X., 2005, Application of Envisat ASAR image in flood monitoring for Whouzoui city in 2005, *Actes de colloque, 2005 Dragon Symposium "Mid Term Results"*. Santorini, Greece.
- Yen B. C., 2002, Open channel flow resistance, *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, Vol. 128 (1), pp. 20-39.
- Yésou H., Chastanet P., Fellah K., Jeanblanc Y., De Fraipont P. & Bequignon J., 2000, Contribution of ERS SAR images and ERS coherence data to a flood information system on the Meuse basin - France, *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, pp. 597-605.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Yésou H., Clandillon S., Allenbach B., Bestault C. & de Fraipon P., 2002, Exploitation de données SPOT 5, SPOT 4 et SPOT 2 pour la cartographie des zones affectées par les inondations de type Cévenol les 9-10 septembre 2002 dans le département du Gard, *Actes de colloque*, Sertit.
- Young P. C., 1983, The validity and credibility of models for badly-defined systems, in M. B. Beck and G. van Straten, *Uncertainty and forecasting of water quality*, Springer-Verlag: Berlin, pp. 69-98.
- Zhiyong W., Jixian Z. & Tongxiao W., 2004, The contrast research of the methods of restraining the speckle noise of sar images, *Actes de colloque, Geo-Imagery Bridging Continents, XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey.
- Zhou C., Luo J., Yang C., Li B. & Wang S., 2000, Flood monitoring using multi-temporal AVHRR and RADARSAT imagery, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 66, pp. 633-638.
- Zhou X., Dandan L., Huiming Y., Honggen C., Leping S., Guojing Y., Qingbiao H., Brown L. & Malone J. B., 2002, Use of landsat satellite surveillance data to measure impact of the 1998 flood on snail intermediate host dispersal in the lower Yangtze River Basin, *Acta tropica*, pp. 199-205.

Table des illustrations

Figure 1.1 : Principales crues historiques en France (à gauche) et nombre d'inondations, par département, entre 1982 et 2001 (à droite), hors phénomènes liés à la tempête de décembre 1999 .	12
Figure 1.2 : Photographie aérienne de Koeking (Moselle, France) le 28 mai 1983 (DIREN Lorraine [®]).	12
Figure 1.3 : La genèse du phénomène d'inondation (débordement de cours d'eau).	13
Figure 1.4 : Représentation schématique des lits mineur, moyen et majeur en plaine alluviale.	14
Figure 1.5 : Illustration de l'augmentation du débit de pointe de crue due à l'urbanisation des bassins versants (MEDD-PRIM [®]).	16
Figure 1.6 : Champs d'intervention dans la gestion des inondations	19
Figure 1.7 : Représentation d'un cours d'eau par un modèle monodimensionnel (Roux, 2004)	22
Figure 1.8 a) et b) : Variables hydrauliques intervenant dans les équations de Saint-Venant 1D (Roux, 2004).	23
Figure 1.9 : Caractéristiques d'échantillonnage et qualité de l'information échantillonnée (adapté de (Blöschl & Silvapan, 1995))	32
Figure 2.1 : Réflexion, absorption et transmission d'un rayonnement sur un objet.	36
Figure 2.2 : Spectre électromagnétique et bandes spectrales (Bonn & Rochon, 1993)	37
Figure 2.3 : Phénomène d'absorption dans l'atmosphère et spectre d'émission du soleil et de la Terre (CCT [®]).	37
Figure 2.4 : Distorsions géométriques du au relief sur images optiques.	38
Figure 2.5 : Représentation schématique des signatures spectrales des principaux objets présents à la surface de la Terre - d'après (Maurel, 2001).	39
Figure 2.6 : Radar latéral et résolution spatiales (adapté de (Ulaby et al., 1982))	42
Figure 2.7 : Illustration de l'influence de la rugosité sur la rétro-diffusion radar	46
Figure 2.8 : Illustration de l'influence de la longueur d'onde sur la sensibilité du radar à la rugosité de surface pour les bandes X et L (Girard & Girard, 1999).	48
Figure 2.9 : Influence des objets verticaux sur le signal radar selon la polarisation	49
Figure 2.10 : Comportement général de la rétro-diffusion radar en fonction de l'angle d'incidence (Ulaby & Dobson, 1989)	49
Figure 2.11 : Visée oblique et distorsion géométrique.	50
Figure 2.12 : A. Rapprochement du relief et pseudo-ombrage, B. Recouvrement et ombrage.	51
Figure 2.13 A et B : Influence du vent sur la rétrodiffusion de l'eau libre.	53
Figure 2.14 : Lien entre coefficients de rétro-diffusion et coefficients de corrélation interférométrique mesurés pour quelques occupations du sol (Borgeaud & Wegmueller, 1996)	54
Figure 2.15 : Coefficients de rétrodiffusion moyens et écart type obtenus avec des données ENVISAT ASA-APP et ASA IMP et ERS2-PRI (Henry, 2004).	54
Figure 2.16 : Profils radiométriques sur une image composée multipolarisation HH-HV-VV (HH en rouge, HV en vert et VV en bleu) (Henry, 2004)	55

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 2.17 : Illustration de la capacité de pénétration du couvert végétal par le signal radar en fonction de la longueur d'onde (ITC [®])	56
Figure 3.1 : Exemple de carte d'évolution temporelle de surfaces inondées (SERTIT, Sedan / Charleville Mézières (25-12-1993- 02-02-1994) sur fond d'une image ERS (Yésou et al., 2000).	63
Figure 3.2 : Exemple d'hydrogramme et de dates d'acquisition d'images pour lesquelles l'estimation des durées de submersion à partir des images est erronée.	63
Figure 3.3 : Courbe de tarage liant « largeur efficace » inondée (surface ramenée à la longueur du linéaire de rivière) extraite d'images RSO (ERS) avec des mesures de débits (Smith et al., 1995).	68
Figure 3.4 : Estimations des niveaux d'eau obtenues par (Brakenridge et al., 1998) par croisement de limites d'inondation extraites d'imagerie RSO avec des cartes topographiques, comparées à une simulation hydraulique mono-dimensionnelle.	69
Figure 3.5 : Exemple de photographies aériennes de crue (Hérault, novembre 1994) à partir de laquelle peuvent être extraites des informations de limites d'inondation, d'émergence d'objets, de limites naturelles de casier, de connexions, directions et sens d'écoulement entre casiers voisins (Puech & Raclot, 2002).	70
Figure 3.6 : Illustration de la mise en cohérence hydraulique par abaissement des bornes maximales d'estimation des niveaux d'eau (Raclot & Puech, 2003)	71
Figure 3.7 : Calcul de performance d'un modèle hydraulique à partir de mesures de Plus Hautes Eaux in situ pour différentes valeurs de frottement en lit Mineur (Matgen et al., 2004).	73
Figure 3.8 : Paramètres géométriques et de freinage à l'écoulement associés au modèle 1D à géométrie simplifié (Roux et al., 2003).	74
Figure 0.1 : Schéma d'une chaîne de traitement opérationnelle permettant d'exploiter une images satellitaire de crue pour parvenir à la prévision.	79
Figure 4.1 : Illustration sur des histogrammes de l'influence du chatoiement pour la discrimination de l'eau sur les images radar.	83
Figure 4.2 : Illustration du double seuillage sur l'histogramme des radiométries de l'image radar.	86
Figure 4.3 : Résultat du double seuillage sur image radar : étendue inondée (en bleu clair) avec une limite floue (en bleu foncé).	86
Figure 4.4 A à C : Extraction d'une carte d'inondation certaine.	89
Figure 4.5 A à C : De la carte d'inondation certaine aux bordures floues dilatées	90
Figure 4.6 : Influence des structures topographiques sur l'incertitude d'estimation des niveaux d'eau, compte tenu de l'épaisseur des limites floues sur la carte d'inondation certaine.	91
Figure 4.7 A à C : Des limites floues dilatées aux segments informatifs.	92
Figure 4.8 : Schéma de principe de l'extraction d'une carte d'inondation certaine et des bordures d'inondation pertinentes pour une estimation des niveaux d'eau.	93
Figure 5.1 : Géométrie d'un modèle hydraulique 1D et sens d'écoulement associé.	97
Figure 5.2 A à C : Définition de la hiérarchie hydraulique des segments informatifs à partir de la géométrie d'un modèle hydraulique 1D.	98
Figure 5.3 A à F : Étapes de la construction de la hiérarchie hydraulique.	101
Figure 5.4 : Illustration de la notion de conflit hydraulique entre des estimations de niveau d'eau.	103
Figure 5.5 : Identification et résolution d'un conflit hydraulique	104

Figure 5.6 : Principe de la mise en cohérence hydraulique des estimations des niveaux d'eau : extraction de l'information commune cohérente.	105
Figure 5.7 : Propagation des contraintes de cohérence hydraulique ordonnée suivant la logique d'écoulement de la hiérarchie hydraulique avec un schéma monodimensionnel.	105
Figure 5.8 : Hiérarchie hydraulique des segments informatifs et Chemins Hydrauliques Préférentiels (CHP).	106
Figure 5.9 : Organigramme du programme de mise en cohérence hydraulique des estimations primaires de niveau d'eau.	107
Figure 5.10 : Schéma de principe de la méthode de quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau.	108
Figure 6.1 : Estimation de l'emprise transversale observée de l'inondation sur un profil en travers à partir de la carte d'inondation certaine	116
Figure 6.2 : Calcul de l'emprise transversale simulée de l'inondation sur un profil en travers à partir du niveau d'eau calculé par le modèle.	117
Figure 7.1 : Bassin versant de la partie française de la Moselle et site d'étude (inspiré de (DIREN Lorraine [®]))	128
Figure 7.2 : Quelques caractéristiques climatiques de la Moselle à Metz (plateau lorrain) (Météo France [®]).	129
Figure 7.3 : Gorges en aval de la commune de Berg/Moselle	129
Figure 7.4 : Hydrogrammes collectés pour la crue de février 1997 et mise en correspondance avec la date d'acquisition de l'image Radarsat en période de crue.	131
Figure 7.5 : Image RADARSAT-1 du 28 février 1997 et site d'étude.	132
Figure 7.6 : Bassin versant et site d'étude de l'Alzette (Observatoire Hydro-Climatologique du Grand Duché du Luxembourg, 2004)	134
Figure 7.7 : Régime pluviométrique du bassin versant de l'Alzette (Pfister L., 2000).	134
Figure 7.8 : Hydrogramme observé à Steinsel pour la crue de janvier 2003 et date d'acquisition de l'image satellitaire ENVISAT.	135
Figure 7.9 A et B : A profils en travers du modèle hydraulique 1D de l'Alzette (Matgen et al., 2004) et mesures de PHE, et B étendue inondée extraite de l'image ENVISAT du 2 février 2003, sur fond d'une image satellitaire optique IKONOS (résolution spatiale 1m).	136
Figure 7.10 : Bassin versant de la partie française de la Meuse et site d'étude - inspiré de (DIREN Lorraine [®]).	138
Figure 7.11 : Hydrogrammes enregistrés aux stations hydrométriques sur la Meuse fin 1993/ début 1994 (les flèches noires indiquent les dates d'acquisition des images ERS).	139
Figure 7.12 : Bassin versant de l'Hérault, site d'étude et station hydrométriques (Raclot, 2003a).	140
Figure 7.13 Hydrogrammes enregistrés aux stations hydrométriques sur l'Hérault fin 2003 (la flèche noire indique la date d'acquisition de l'image SPOT4 et des photographies aériennes).	141
Figure 8.1 A et B : Carte d'inondation aux limites floues obtenue par double seuillage radiométrique, A avant et B après épuration des groupes de pixels isolés.	146
Figure 8.2 A et B : A Identification des zones incertaines et B carte d'inondation certaine	147
Figure 8.3 : Limites floues extraites de la carte d'inondation certaine, dilatée afin de prendre en compte les incertitudes spatiales	148
Figure 8.4 : Représentation des cinq éléments constitutifs du masque niveau sur fond des photographies IGN au 25000 ^{ème} .	149

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 8.5 A et B : A Application du masque niveau aux limites floues et B segments informatifs résultants.	150
Figure 8.6 : Schéma de circulation des eaux	152
Figure 8.7 A et B : Incertitudes sur les estimations brutes (A) et resserrées (B) de niveaux d'eau pour chaque segment informatif.	153
Figure 8.8 A et B : Exemple d'estimations des niveaux d'eau (intervalles [Max, Min]). Les triangles jaunes représentent la cote fond du lit mineur de la Moselle estimée à partir du MNT et projetée le long des lignes d'écoulement préférentiel.	154
Figure 8.9 : Schéma simplifié d'une vanne (adapté de (USACE, 2005a)).	156
Figure 8.10 : Vue en plan de la géométrie du modèle hydraulique mis en place sur le site d'étude de la Moselle	159
Figure 8.11 : Critères de Nash obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo pour le Manning en lit Mineur (un point de chaque couleur par simulation, une couleur par critère, les Nash amont et aval correspondant respectivement au critères de Nash calculés à partir des hydrogrammes à la prise d'eau de la centrale de Cattenom et à la station hydrométrique d'Uckange).	162
Figure 8.12 : Illustration de l'intérêt d'intégrer les étendues inondées dans la procédure de calage.	164
Figure 8.13 : Critères de performance de Nash, $Diff_{\text{erreur}}$, et $Perf_{\text{étendue_inondée}}$ obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo pour le Manning en lit Mineur (un point de chaque couleur par simulation, une couleur par critère).	165
Figure 8.14 : Critères de Nash et fonction d'appartenance des niveaux d'eau obtenus à l'issue des simulations Monte-Carlo pour le Manning en lit Mineur (à gauche) et le Manning des sections aval (à droite).	167
Figure 9.1 : Influence de la végétation basse (de type jachère agricole) sur le signal rétro-diffusé selon la polarisation du capteur radar.	176
Figure 9.2 A à C : Des limites de l'inondation aux segments informatifs pour le site de l'Alzette.	178
Figure 9.3 : Évolution des incertitudes d'estimation des niveaux d'eau en fonction de la taille de découpage des segments informatifs	181
Figure 9.4 A et B : Taches d'inondations radar (à gauche) et tache MNT.	182
Figure 9.5 : Exemple de schéma d'une chaîne de traitement automatisée d'une image radar permettant le calcul du devenir probable de l'inondation.	191
Figure A 1.1 : Carte des cumuls de précipitation au mois de février 1997 en Moselle/Meurthe et Moselle.	3
Figure A 2.1 : Vue en plan du barrage de Koenigsmacker	7
Figure A 2.2 : Vue en coupe des piles segment du barrage de Koenigsmacker (cotes NGF)	8
Figure A 2.3 : Vue en coupe des piles clapet du barrage de Koenigsmacker (cotes NGF)	8
Figure A 2.4 : Vue en plan du barrage d'Apach.	12
Figure A 2.5 : Vue en coupe des piles segment et clapet du barrage d'Apach (cotes NGF)	12
Figure A 3.1 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 28 décembre 1993 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	13
Figure A 3.2 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 3 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	14

Figure A 3.3 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 9 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	15
Figure A 3.4 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 15 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	16
Figure A 3.5 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image satellitaire ERS-1 acquise le 28 décembre 1993 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	18
Figure A 3.6 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image satellitaire ERS-1 acquise le 9 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	19
Figure A 3.7 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image satellitaire ERS-1 acquise le 15 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.	20
Figure A 4.1 : Résultat des évaluations des simulations Monte-Carlo suivant les critères de NASH pour le site d'étude de la Moselle.	21
Figure A 4.2 : Résultat des évaluations des simulations Monte-Carlo suivant les critères de Nash et de performance sur les étendues inondées pour le site d'étude de la Moselle (hors Manning en lit mineur).	22
Figure A 4.3 : Résultats des évaluation des simulations Monte-Carlo suivant les critères de Nash et de performance sur les niveaux d'eau pour le site d'étude de la Moselle (hors Manning en lit mineur et sur les sections aval).	23
Figure A 4.4 : Résultats d'évaluation des simulations Monte-Carlo suivant les critères de performance des niveaux d'eau locaux et pour les casiers hydrauliques pour le site d'étude de la Moselle.	24
Figure A 6.1 : Image SPOT-4 acquise le 7 décembre 2003 à 10h40 sur le site d'étude de l'Hérault, affichée en fausses couleurs (R, V, B=PIR, R, V).	26
Figure A 6.2 : Histogramme du canal PIR d'une partie de l'image SPOT 4 pour laquelle la répartition surfaces inondées et non inondées est équivalente.	28
Figure A 6.3 A et B : Comparaison entre carte d'inondation SPOT4 par excès et carte photo-interprétée sur les photographies aériennes dans les zones d'intérêt A et B.	29
Figure A 6.4 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image SPOT-4 acquise le 7 décembre 2003 à 10h40 sur le site d'étude de l'Hérault.	30

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Méthodes utilisées pour la création de MNT (Raclot, 2003a), basées sur des techniques de télédétection.	29
Tableau 2.1 : Principaux satellites optiques passifs actuels, anciens (en italique) et futurs (en gras) (Henry, 2004).	40
Tableau 2.2 : Bandes spectrales radar - fréquences et longueurs d'ondes associées.	47
Tableau 2.3 : Principaux satellites RSO actuels, anciens (en italique) et futurs (en gras).	52
Tableau 3.1 : Actions chartes « inondation » entre juin 2005 et avril 2006 pour lesquelles le service de cartographie rapide du SERTIT a été mis à contribution.	60
Tableau 3.2 : Nombre d'images d'inondation exploitables potentiellement disponibles et probabilités d'obtentions associées pour une période d'observation de 20 jours de la plaine du Gharb (Maroc) (Joveniaux, 1986).	62
Tableau 8.1 : Variables et paramètres des lois de vanne et de déversoir implémentées sous HEC-RAS.	157
Tableau 8.2 : Paramètres de calage et intervalles de valeurs physiquement acceptables implémentés dans le générateur de paramètres.	160
Tableau 8.3 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres vis à vis des hydrogrammes interne et aval.	163
Tableau 8.4 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres vis à vis des hydrogrammes interne et aval et des surfaces inondées extraites de l'image radar.	166
Tableau 8.5 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres vis à vis des hydrogrammes internes et aval et des estimations des niveaux d'eau extraites de l'image satellitaire radar.	168
Tableau 8.6 : Intervalles de valeurs acceptables des paramètres au regard des hydrogrammes internes et aval et des estimations des niveaux d'eau extraites de l'image satellitaire radar (performances globales et locales).	170
Tableau 9.1 : Termes des matrices de confusion obtenues par comparaison entre les cartes radar et PI de la retenue d'eau de la centrale de Cattenom (en pourcentage de l'aire de la retenue sur la carte PI).	174
Tableau 9.2 : Comparatif des demi-incertitudes sur les estimations des niveaux d'eau obtenues à partir d'images satellitaires radar, des photographies aériennes.	180
Tableau 9.3 : Analyse de la sensibilité des résultats de la mise en cohérence hydraulique à la taille du découpage de segments informatifs.	181
Tableau 9.4 : Termes des matrices de confusion obtenues par comparaison entre les cartes d'inondation MNT et radar, en dehors des zones urbaines, des zones de végétation haute et des limites floues.	182
Tableau A 5.1 : Valeurs du coefficient de Strickler en fonction de la typologie du cours d'eau, d'après M. Pradé (Roux, 2004).	25
Tableau A 6.1 : Termes de la matrice de confusion entre les étendues inondées observées sur l'image SPOT4 et sur les photographies aériennes (en pourcentage de la surface inondée photo-interprétée).	28

Annexes :

**Documents et travaux
complémentaires**

Sommaire des Annexes

Annexe 1.	Pluviométrie de février 1997 en lorraine	3
Annexe 2.	Barrages de Koenigsmacker et Apach	4
Annexe 3.	Cartes d'inondations obtenues à partir d'images ERS-1 pour le site d'étude de la Meuse.	13
Annexe 4.	Résultats complémentaires des évaluations des simulations Monte-Carlo pour le site d'étude de la Moselle.	21
Annexe 5.	Ordres de grandeur des coefficients de frottement de Strickler obtenus par M. Pradé.	25
Annexe 6.	Carte d'inondation obtenue à partir d'une image SPOT-4 pour le site d'étude de l'Hérault.	26

Annexe 1. Pluviométrie de février 1997 en lorraine

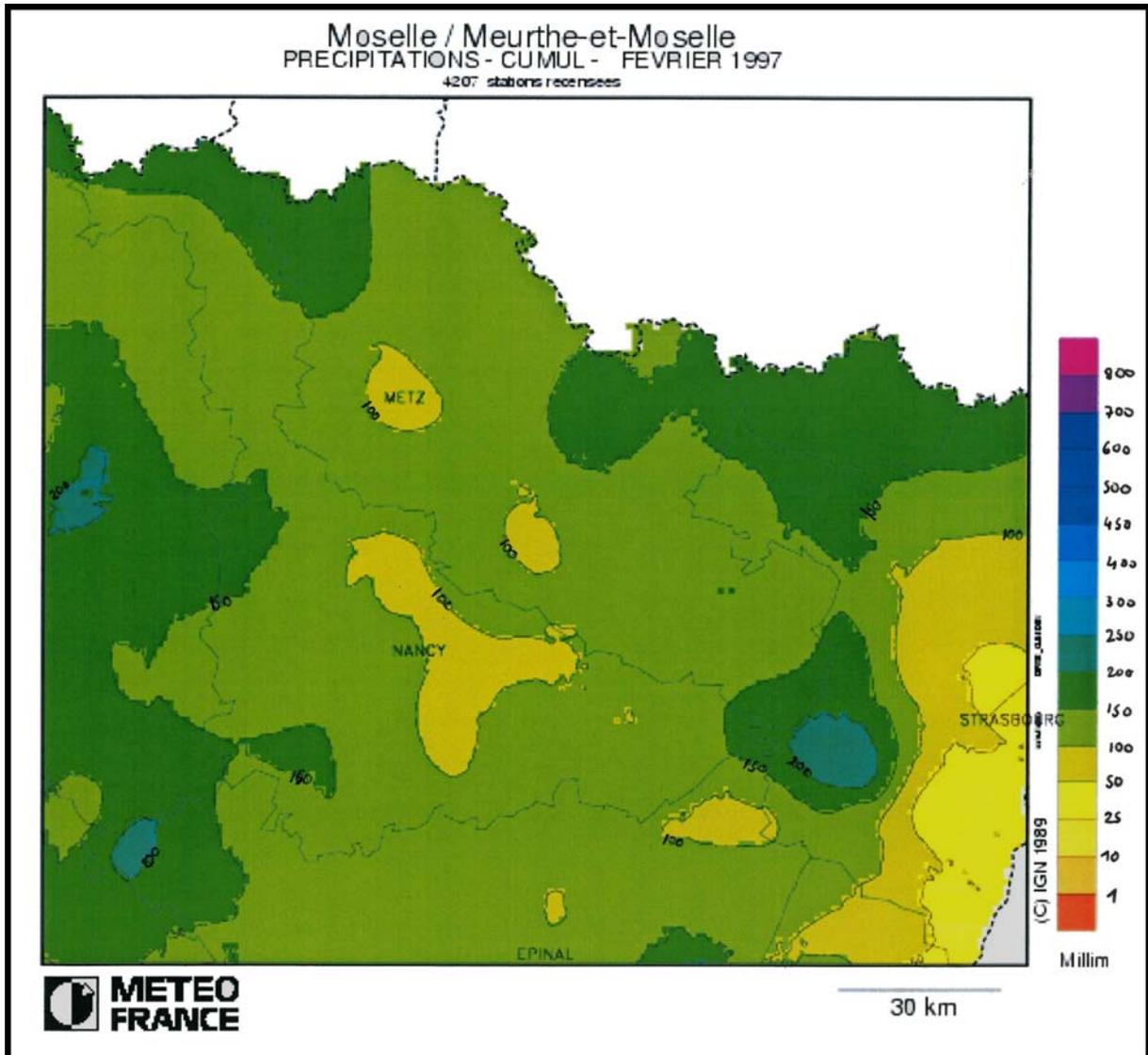


Figure A 1.1 : Carte des cumuls de précipitation au mois de février 1997 en Moselle/Meurthe et Moselle.

Annexe 2. Barrages de Koenigsmacker et Apach

Sommaire

A2.1 Barrage de Koenigsmacker	4
A2.1.1 Consignes de conduite du barrage de Koenigsmacker	4
A2.1.1.1 Consignes générales	4
A2.1.1.2 Consignes de crue	5
A2.1.1.3 Consignes de manœuvre du barrage de Koenigsmacker	5
A2.1.2 Plans du barrage de Koenigsmacker	7
A2.2 Barrage d'Apach	9
A2.2.1 Consignes de conduite du barrage d'Apach	9
A2.2.1.1 Consignes générales	9
A2.2.1.2 Consignes de crue	9
A2.2.1.3 Consignes de manœuvre du barrage	10
A2.2.2 Plans du barrage de Koenigsmacker	12

L'annexe 2 rassemble des extraits de documents fournis par les Services de la Navigation du Nord-Est concernant la géométrie et les consignes de conduite des barrages de Koenigsmacker et Apach.

A2.1 Barrage de Koenigsmacker

A2.1.1 Consignes de conduite du barrage de Koenigsmacker

A2.1.1.1 Consignes générales

La surveillance du plan d'eau amont incombe à l'éclusier en poste. Celui-ci assure les manœuvres à distance du barrage, pose les panneaux de marque de crue sur son écluse et prévient les écluses amont et aval, et la subdivision de l'évolution de la crue. Pendant les heures d'ouverture, l'atelier de Koenigsmacker assure les manœuvres de la porte de garde et les manœuvres en local du barrage. En dehors des heures d'ouverture, l'éclusier prévient le cadre d'astreinte des manœuvres à effectuer, celui-ci lance l'intervention de l'astreinte ME, VN, et renfort de crue.

Pour le contrôle du plan d'eau amont, aval et position du barrage l'éclusier a à sa disposition :

1) Un micro ordinateur appartenant à NNE indiquant :

- la position des 4 vannes
- les graphes des fluctuations du niveau d'eau
- le journal des événements liés au barrage consultable sur l'année en cours (les données sont archivées tous les ans).

2) Une échelle limnimétrique à l'aval de l'écluse.

3) Un minitel propriété de CEDECEL qui peut être consulté à tout moment pour avoir des informations sur :

- les hauteurs d'eau amont/aval au droit de la micro centrale
- la puissance turbinée, la chute d'eau et les débits.

4) Une alarme NNE (avec voyant clignotant rouge) de défaut niveau réglée à 148,90 NGF mini et 149,10 NGF maxi.

- Une alarme CEDECEL (klaxon) niveau bas.
- Une lampe témoin (orange) indiquant la régulation par le personnel SNNE.
- Un commutateur pour déterminer qui gère le plan d'eau

A2.1.1.2 Consignes de crue

Les marques de crue I et II sont données par l'écluse de Stadtbredimus-Palzem (Luxembourg) à l'éclusier d'Apach qui prévient l'éclusier de Koenigsmacker, qui lui-même avertit l'écluse de Thionville. Information transmise à la subdivision durant les jours ouvrables ou au cadre d'astreinte en dehors des jours ouvrables (en journée). Pose du panneau sur l'écluse de Koenigsmacker par la personne en poste.

A la cote aval de 147,80 NGF : marque de crue III = arrêt de la navigation. Information transmise aux écluses de Thionville et d'Apach, à la subdivision durant les jours ouvrables ou au cadre d'astreinte en dehors des jours ouvrables. Pose du panneau sur l'écluse de Koenigsmacker par la personne en poste.

A2.1.1.3 Consignes de manœuvre du barrage de Koenigsmacker

Présentation

Le barrage de Koenigsmacker comporte 4 passes de 27 m de large chacune :

- 2 vannes clapets passes n° 1 et 2 en rive gauche, destinées aux réglages fins du plan d'eau.
- 2 vannes segments passes n° 3 et 4 en rive droite, utilisées en période de fort débit lorsque les clapets ne permettent plus d'évacuer rapidement une montée importante du bief amont.

Une micro centrale à production électrique est implantée en rive droite, équipée de 3 turbines pouvant absorber 50 m³ chacune.

La cote de retenue du plan d'eau amont est de 149,42 IGN 69 soit 149,00 NGF

Débit réservé: oui

A partir du poste écluse

Les différentes manœuvres décrites ci-dessous doivent permettre de maintenir le niveau amont du barrage à 149,00 NGF. Pour cela, il existe une alarme sonore de défaut niveau (appartenant à la NNE) lorsque la cote se trouve hors plage (mini : 148,90 NGF ; maxi : 149,10 NGF), ainsi qu'une alarme (appartenant à CEDECEL) pour signaler un niveau trop bas du plan d'eau amont qui risque d'entraîner un arrêt brutal de la micro centrale.

Toute manœuvre importante doit être signalée à l'ouvrage directement en aval. Le plan d'eau doit être géré dans le temps et non pas par des manœuvres courtes. L'ouverture des passes doit rester équilibrée et limitée à 40 cm de différence maximum (dans le cas où la disponibilité technique le permet).

A * $0 < \text{Débit} < 15 \text{ m}^3/\text{s}$

Usine à l'arrêt. La régulation du plan d'eau est gérée par l'éclusier avec les clapets. Si aucune manœuvre n'est effectuée, le clapet n° 1 sert au débit réservé. En période d'étiage signaler toute manœuvre à l'écluse aval.

B * $15 \text{ m}^3/\text{s} < \text{Débit} < 160 \text{ m}^3/\text{s}$

La centrale fonctionne et régule le plan d'eau. Clapets et segments sont à l'étanchéité sauf le clapet n° 1. ouvert pour le débit réservé (15 cm environ).

En cas d'arrêt de la centrale, le débit turbiné sera automatiquement reversé sur la passe en compensation. Si au bout d'1 heure la centrale n'a pas redémarré, l'éclusier sera prévenu pour qu'il reprenne la régulation du plan d'eau. Dans l'hypothèse de non-fonctionnement de la compensation, l'éclusier en poste préviendra immédiatement l'atelier de Koenigsmacker de cette anomalie.

C * $\text{Débit} > 160 \text{ m}^3/\text{s}$

Usine au maximum. L'éclusier en poste reprend la régulation en utilisant les 2 clapets et le segment n°1. Le segment n° 2 doit rester fermé pour la compensation tant que la centrale fonctionne.

En cas d'arrêt de la centrale, le débit turbiné sera automatiquement reversé sur la passe en compensation. Dans l'hypothèse de non-fonctionnement de la compensation, l'éclusier en poste préviendra immédiatement l'atelier de Koenigsmacker de cette anomalie.

Usine à l'arrêt (hauteur de chute insuffisante $\approx 1,00 \text{ m}$)

Utiliser le deuxième segment jusqu'à équilibrage.

Remarque : des rehausses seront installées sur les segments, ce qui permettra de maintenir un PES de 149,00 NGF avec la compensation sur une de ces passes.

A la décrue

Régulation du plan d'eau par l'éclusier jusqu'au retour à la position B en commençant par les segments.

Ne pas oublier de refermer totalement la passe en compensation dès la remise en marche de la centrale.

A partir du barrage

Clapets abaissés, segments levés, si la cote aval est supérieure à 147,80 NGF le barrage doit être entièrement ouvert : les segments sont mis hors d'eau et verrouillés par le personnel de l'atelier de Koëningmacker ou par la personne d'astreinte. C'est la personne en poste qui prend contact avec le responsable d'atelier durant les jours ouvrables ou avec le cadre d'astreinte en dehors de cette plage.

A la décrue, la remise en eau du barrage se fait en local : les segments sont déverrouillés et remis à fleur d'eau.

A2.1.2 Plans du barrage de Koenigsmacker

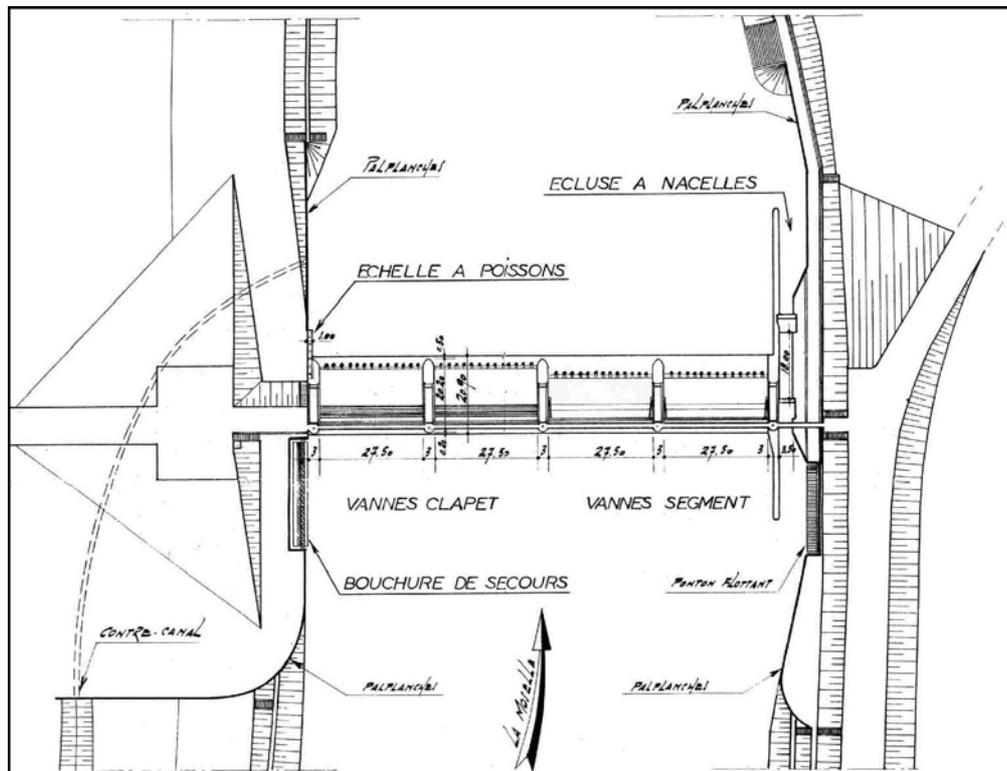


Figure A 2.1 : Vue en plan du barrage de Koëningmacker

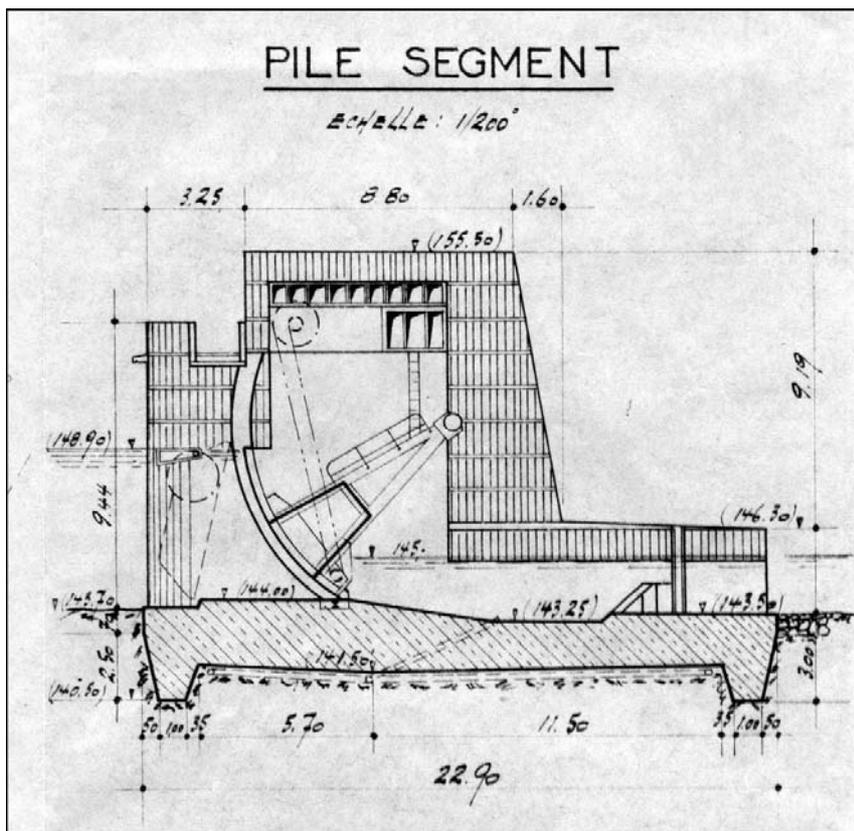


Figure A 2.2 : Vue en coupe des piles segment du barrage de Koenigsmacker (cotes NGF)

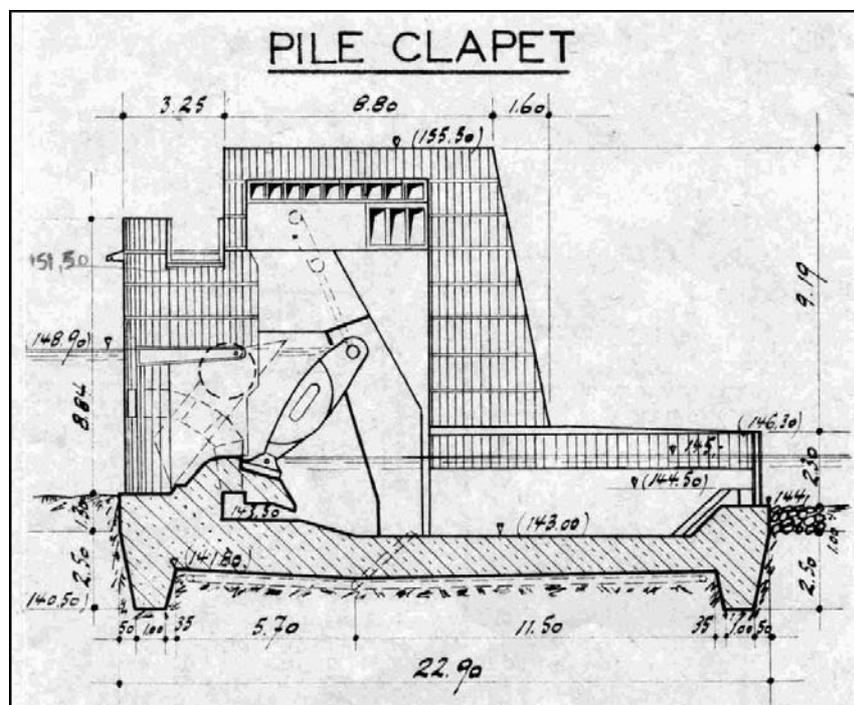


Figure A 2.3 : Vue en coupe des piles clapet du barrage de Koenigsmacker (cotes NGF)

A2.2 Barrage d'Apach

A2.2.1 Consignes de conduite du barrage d'Apach

A2.2.1.1 Consignes générales

La surveillance du plan d'eau amont incombe à l'éclusier en poste. Celui-ci assure les manœuvres à distance du barrage, pose les panneaux de marque de crue sur son écluse et prévient les écluses amont et aval, et la subdivision de l'évolution de la crue.

Pendant les heures d'ouverture, l'atelier de Koenigsmacker assure les manœuvres de la porte de garde et les manœuvres en local du barrage.

En dehors des heures d'ouverture, l'éclusier prévient le cadre d'astreinte des manœuvres à effectuer, celui-ci lance l'intervention de l'astreinte ME, VN, et renfort de crue.

Pour le contrôle du plan d'eau amont, aval et position du barrage l'éclusier a à sa disposition :

- 1) Une échelle limnimétrique à l'aval de l'écluse.
- 2) Un minitel propriété de CEFRALUX qui peut être consulté à tout moment pour avoir des informations sur :
 - les hauteurs d'eau amont/aval au droit de la micro centrale,
 - la puissance turbinée, la chute d'eau et les débits.
- 3) Une alarme NNE de défaut niveau réglée à 145,00 NGF mini et 145,20 NGF maxi.
- 4) Une alarme CEDECEL niveau bas.
- 5) Une lampe témoin indiquant la régulation par le personnel NNE.
- 6) Un commutateur pour déterminer qui gère le plan d'eau.

A2.2.1.2 Consignes de crue

Les marques de crue I et II sont données par l'écluse de Stadtbredimus-Palzem (Luxembourg) à l'éclusier d'Apach qui prévient l'éclusier de Koenigsmacker. Information transmise à la subdivision durant les jours ouvrables ou au cadre d'astreinte en dehors des jours ouvrables (en journée). Pose du panneau sur l'écluse d'Apach par la personne en poste.

A la cote aval de 143,60 NGF : marque de crue III = arrêt de la navigation. Information transmise aux écluses de Koenigsmacker et de Stadtbredimus, à la subdivision durant les jours ouvrables ou au cadre d'astreinte en dehors des jours ouvrables. Pose du panneau sur l'écluse d'Apach par la personne en poste.

A2.2.1.3 Consignes de manœuvre du barrage

Présentation

Le barrage d'Apach comporte 3 passes d'une largeur de 27,50 m chacune :

- 1 vanne clapet passe n° 1 destinée aux réglages fins du plan d'eau.
- 2 vannes segments passes n° 2 et 3 utilisées en période de fort débit, lorsque la vanne clapet ne permet plus d'évacuer rapidement une montée importante du bief amont.

Une micro centrale à production électrique est implantée en rive gauche, équipée de 2 turbines pouvant absorber au total 150 m³.

La cote de retenue du plan d'eau amont est de : 145,54 IGN 69 soit 145,10 NGF

Débit réservé : non

A partir du poste écluse

Les différentes manœuvres décrites ci-dessous doivent permettre de **maintenir le niveau amont du barrage à 145,10 NGF**. Pour cela, il existe une alarme sonore de défaut niveau (appartenant à la NNE) lorsque la cote se trouve hors plage (**mini : 145,00 NGF ; maxi : 145,20 NGF**), ainsi qu'une alarme (appartenant à CEFRALUX) pour signaler un niveau trop bas du plan d'eau amont qui risque d'entraîner un arrêt brutal de la micro centrale.

Toute manœuvre importante doit être signalée à l'ouvrage directement en aval.

Le plan d'eau doit être géré dans le temps et non pas par des manœuvres courtes.

L'ouverture des passes doit rester équilibrée et limitée à 40 cm de différence maximum (dans le cas où la disponibilité technique le permet).

Reporter toutes les manœuvres effectuées dans un cahier journalier.

A * 0 < Débit < 18 m³/s

Usine à l'arrêt

La régulation du plan d'eau est gérée par l'éclusier avec le clapet.

En période d'étiage signaler toute manœuvre à l'écluse aval.

B * 18 m³/s < Débit < 150 m³/s

La centrale fonctionne et régule le plan d'eau.

Les vannes sont toutes à l'étanchéité.

En cas d'arrêt de la centrale, le débit turbiné sera automatiquement reversé sur la passe en compensation. Si au bout d'1 heure la centrale n'a pas redémarré, l'éclusier sera prévenu pour qu'il reprenne la régulation du plan d'eau. Dans l'hypothèse de non-fonctionnement de la compensation, l'éclusier en poste prévendra immédiatement l'atelier de Koenigsmacker de cette anomalie.

C * Débit > 150 m³/s

Ouverture de pales > 80 %

L'éclusier en poste reprend la gestion du plan d'eau en utilisant le clapet et le segment n°2. Le segment n°1 doit rester fermé pour la compensation jusqu'à ce que la centrale s'arrête.

Les groupes en service restent alors sur une ouverture de pales fixes.

En cas d'arrêt de la centrale, le débit turbiné sera automatiquement reversé sur la passe en compensation. Dans l'hypothèse de non-fonctionnement de la compensation, l'éclusier en poste prévendra immédiatement l'atelier de Koenigsmacker. C'est la personne en poste à l'écluse qui prend contact avec le responsable d'atelier durant les jours ouvrables ou avec le cadre d'astreinte en dehors de cette plage.

Usine à l'arrêt

Utiliser le segment n° 1 jusqu'à équilibrage.

A la décrue

Régulation du plan d'eau par l'éclusier jusqu'au retour à la position B en commençant par les segments.

Ne pas oublier de refermer totalement la passe en compensation dès la remise en marche de la centrale.

A partir du barrage

Clapet abaissé, segments levés, si la cote aval est supérieure à 143,60 NGF le barrage doit être entièrement effacé : les segments sont mis hors d'eau et verrouillés par le personnel de l'atelier de Koenigsmacker ou par la personne d'astreinte. C'est la personne en poste qui prend contact avec le responsable d'atelier durant les jours ouvrables ou avec le cadre d'astreinte en dehors de cette plage.

A la décrue, la remise en eau du barrage se fait en local : les segments sont déverrouillés et remis à fleur d'eau.

A2.2.2 Plans du barrage de Koenigsmacker

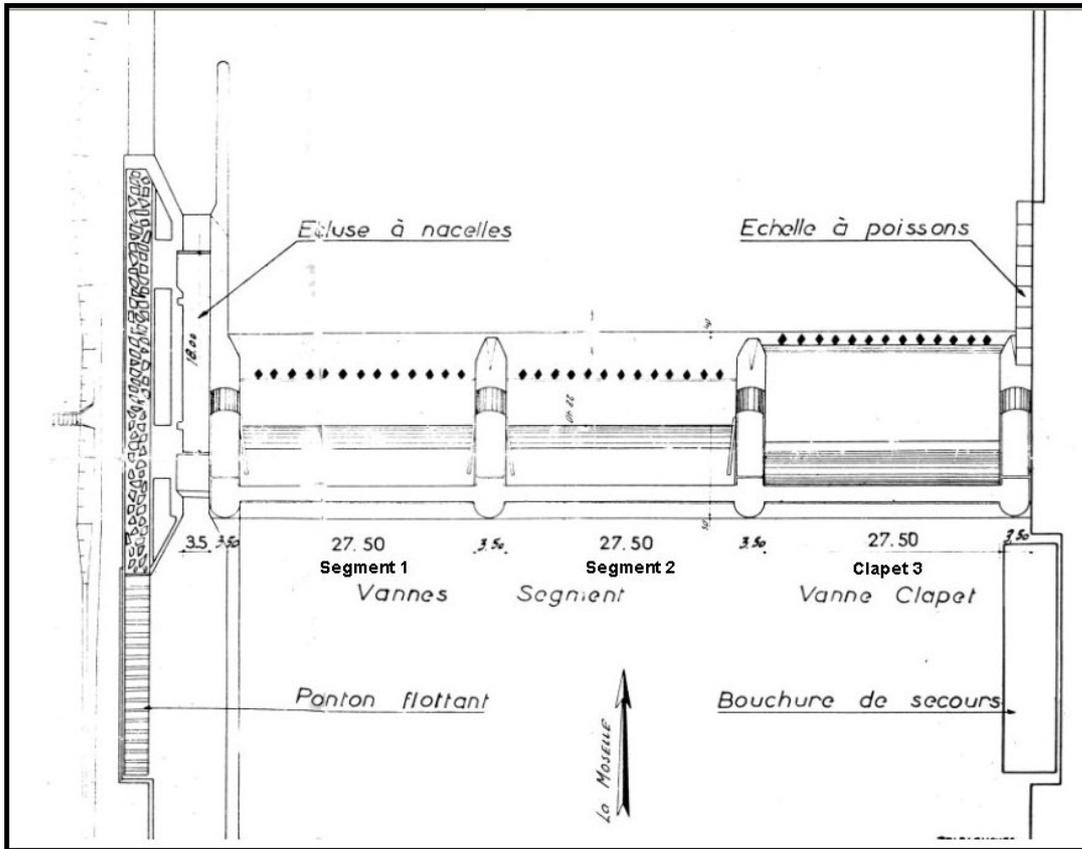


Figure A 2.4 : Vue en plan du barrage d'Apach.

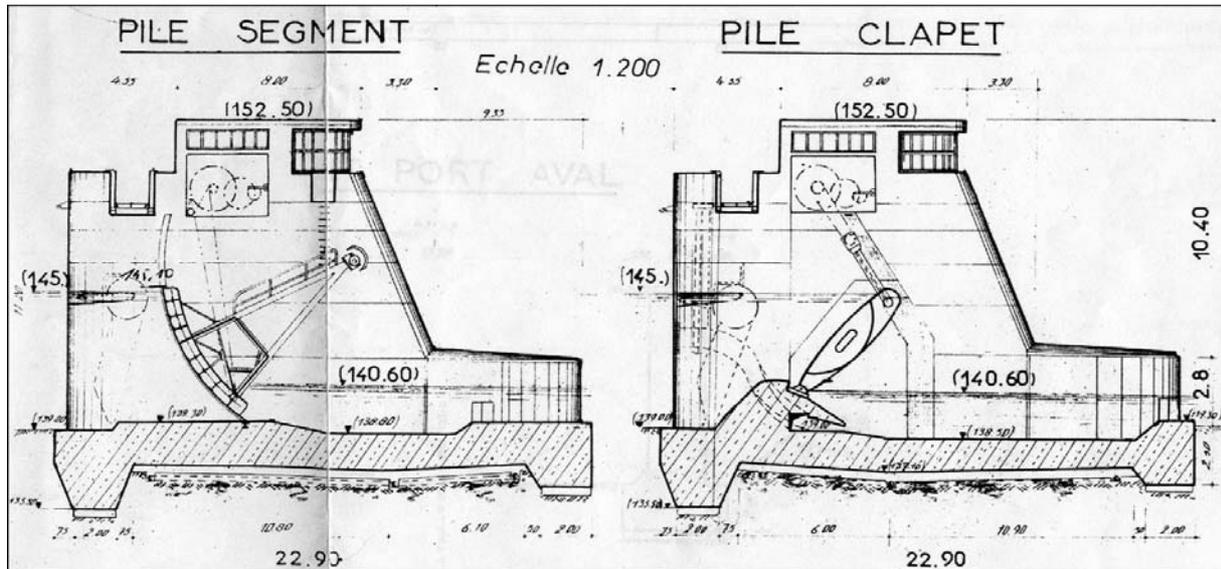


Figure A 2.5 : Vue en coupe des piles segment et clapet du barrage d'Apach (cotes NGF)

Annexe 3. Cartes d'inondations obtenues à partir d'images ERS-1 pour le site d'étude de la Meuse.

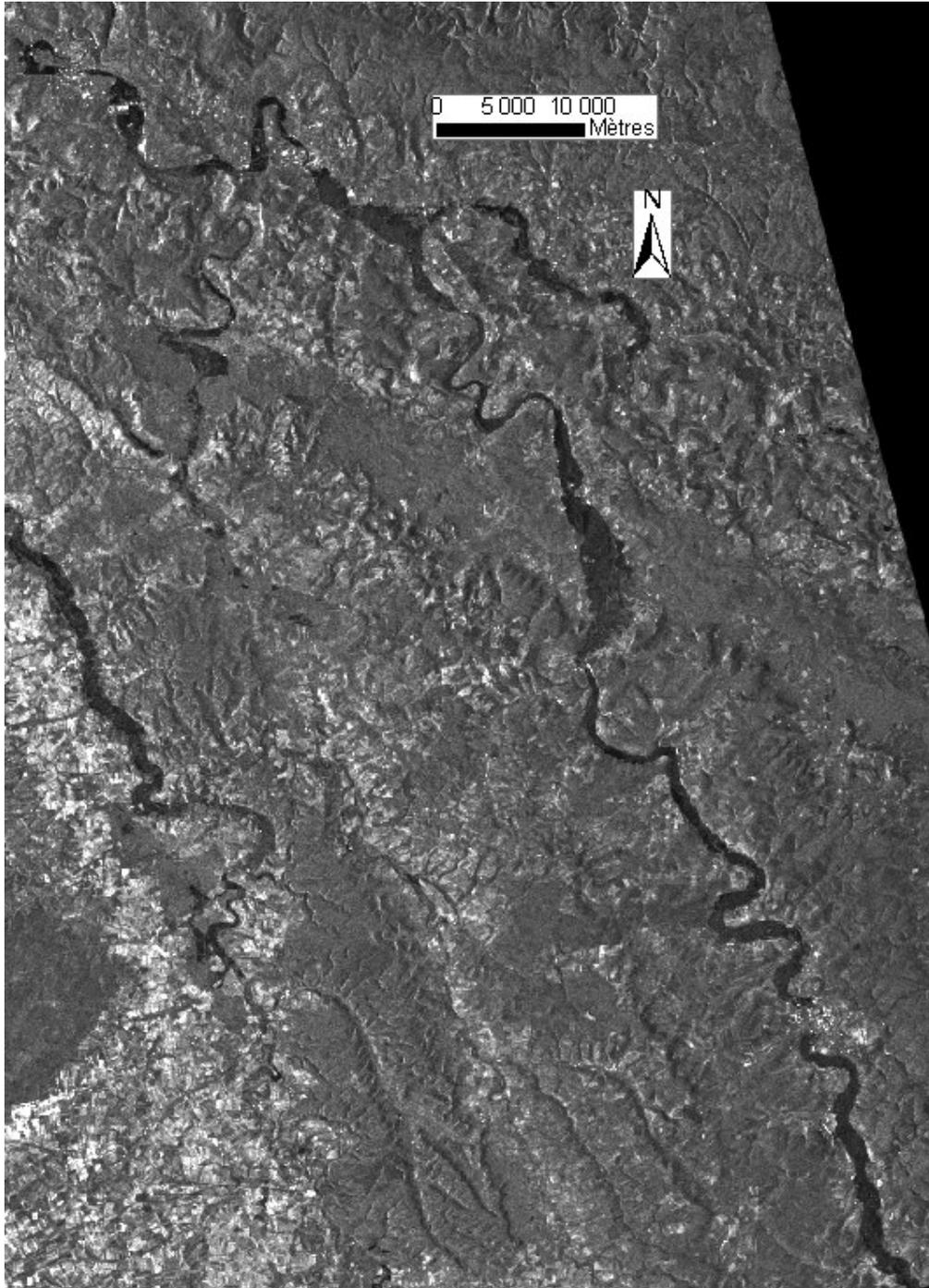


Figure A 3.1 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 28 décembre 1993 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

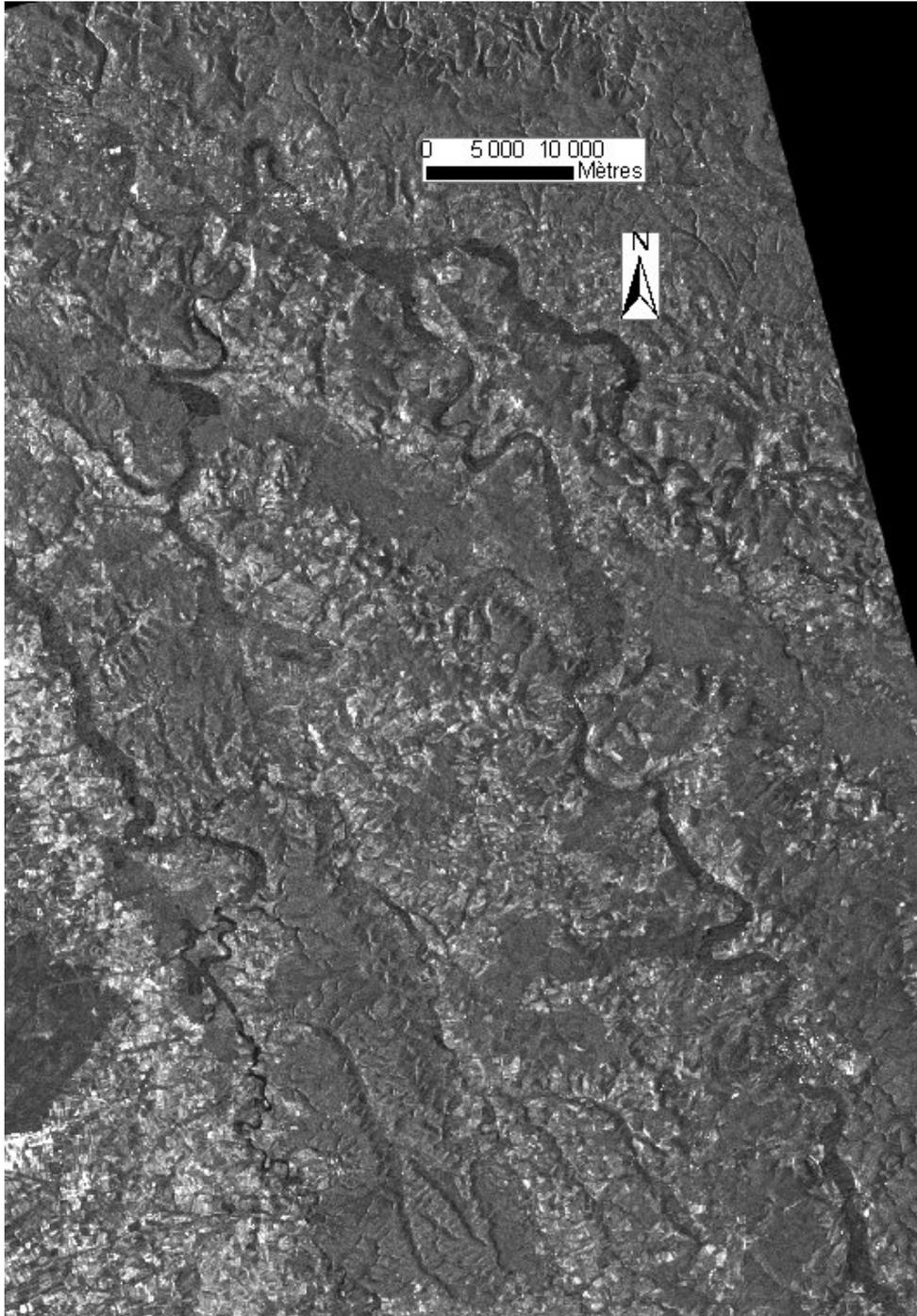


Figure A 3.2 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 3 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

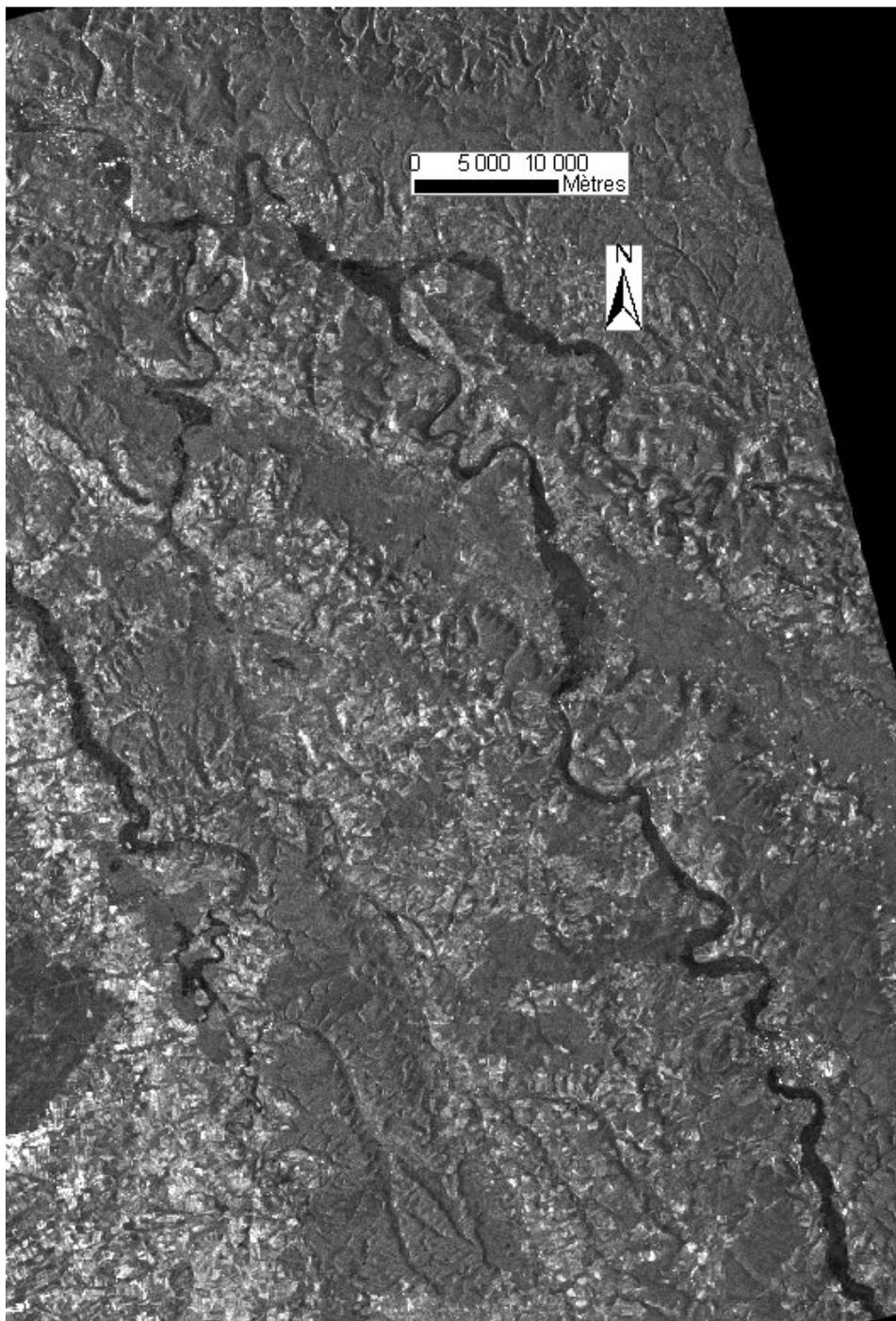


Figure A 3.3 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 9 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

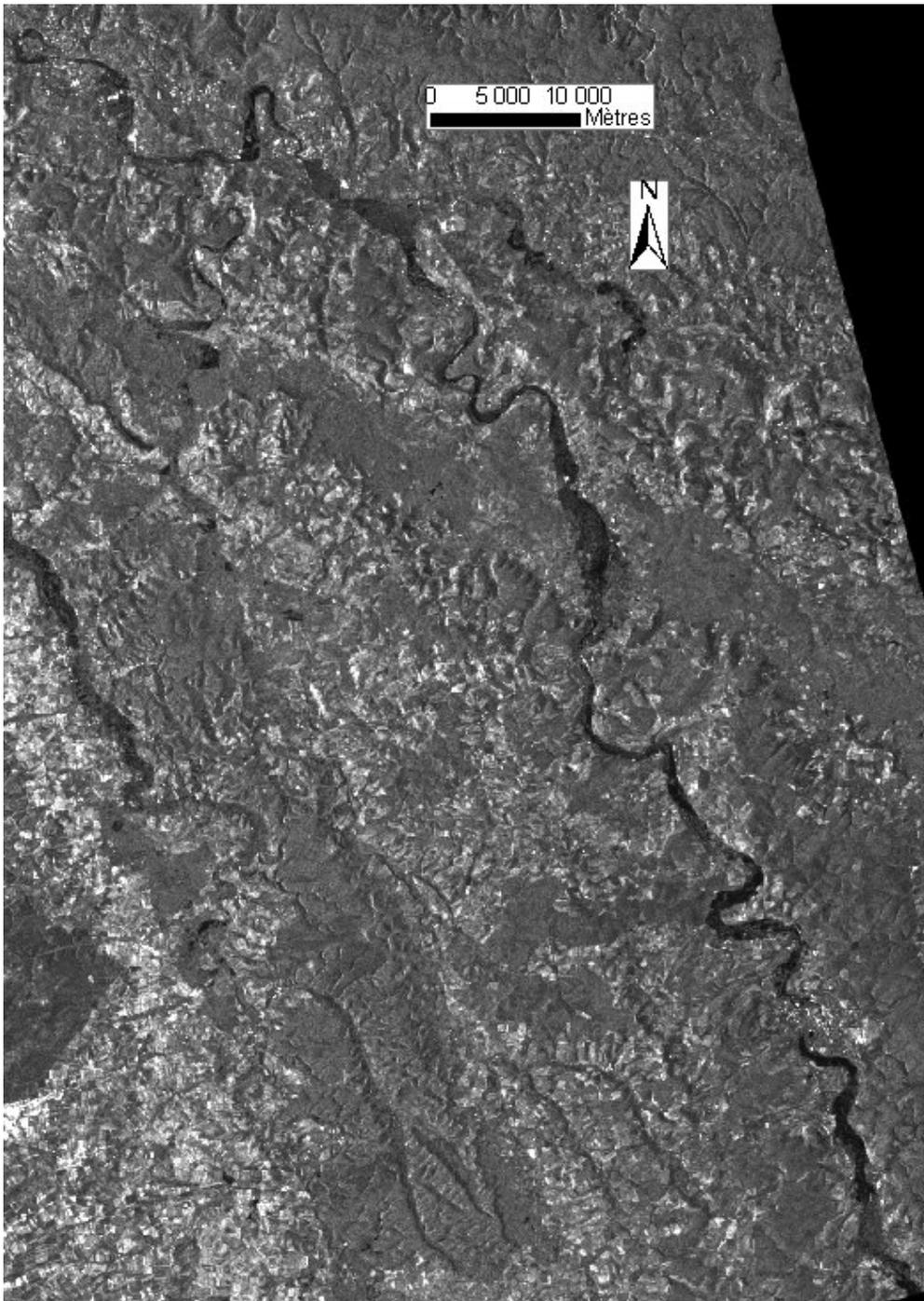


Figure A 3.4 : Image satellitaire ERS-1 acquise le 15 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

Quatre images radar (satellite ERS-1) de crue ont été acquises dans le cadre de la thèse.

Trois d'entre elles ont été jugées utilisables pour la cartographie d'inondation (images du 28 décembre, 9 et 15 janvier 1995). Sur l'image du 3 décembre, l'eau est très peu discernable sur l'image. Nous avons en conséquence retiré cette image de l'analyse.

La méthode de cartographie par double seuillage présentée au paragraphe 4.1 et 4.2 a été appliquée. Sur les trois images retenues, le calcul de l'ENL a permis de considérer un filtrage nécessaire. Le

filtrage a été effectué avec un filtre adaptatif Gamma MAP sur une fenêtre de 3*3 pixels et a permis de rendre les intervalles $I_{\text{chatoiemnt_forêt}}$ et $I_{\text{chatoiemnt_eau}}$ disjoints, où $I_{\text{chatoiemnt_forêt}}$ et $I_{\text{chatoiemnt_eau}}$ sont les intervalles radiométriques contenant 90% des réalisations possibles du chatoiemnt pour les couvertures du sol eau et forêt, avec une hypothèse de distribution gamma (Cf. §4.1).

Les seuils utilisés pour la cartographie de la zone inondée ont été déterminés conformément à la méthodologie de cartographie d'inondation à partir d'image satellitaire radar proposée au paragraphe 4.2 :

- $S_{\min} = Q_{\text{eau}}^{95\%} = 140$ ($\sigma_{S_{\min}}^0 = -15,5\text{dB}$)
- $S_{\max} = \frac{(\overline{I_{\text{eau}}} + \overline{I_{\text{pr}}})}{2} = 240$ ($\sigma_{S_{\max}}^0 = -11,7\text{dB}$)

Ces seuils ont permis d'obtenir trois taches d'inondation radar aux limites floues présentées sur les figures A 5.1, A 5.2 et A 5.3.

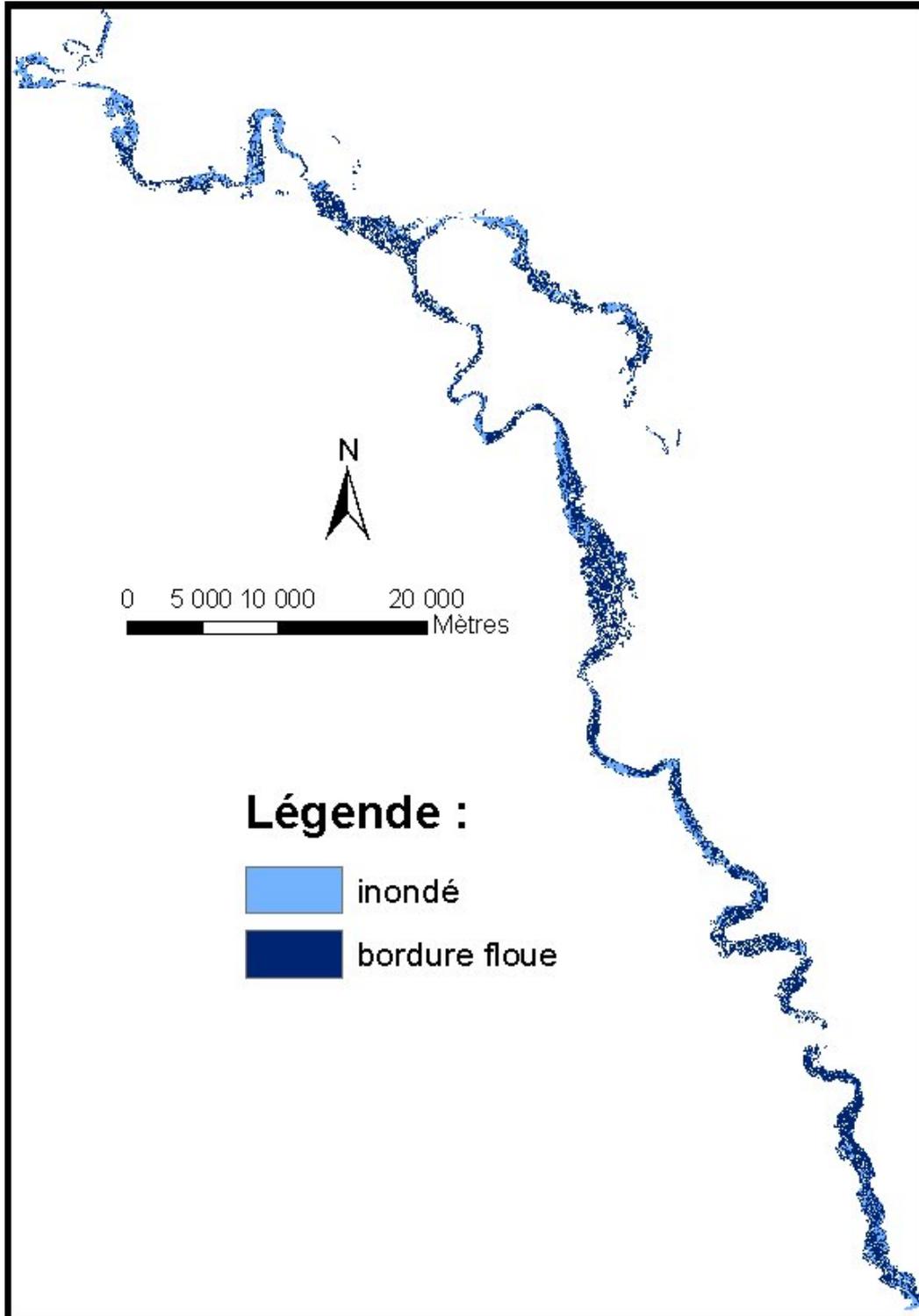


Figure A 3.5 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image satellitaire ERS-1 acquise le 28 décembre 1993 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

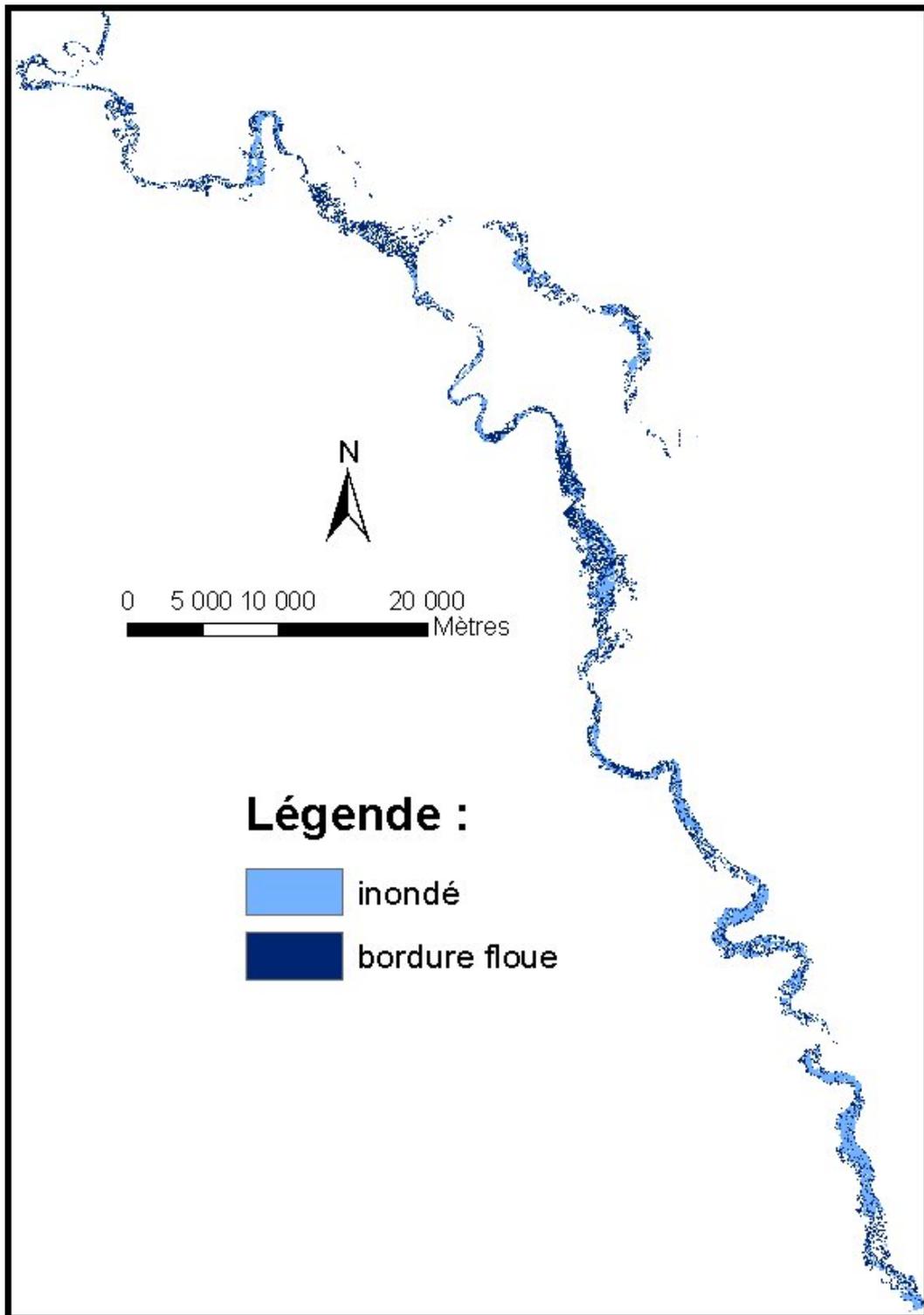


Figure A 3.6 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image satellitaire ERS-1 acquise le 9 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

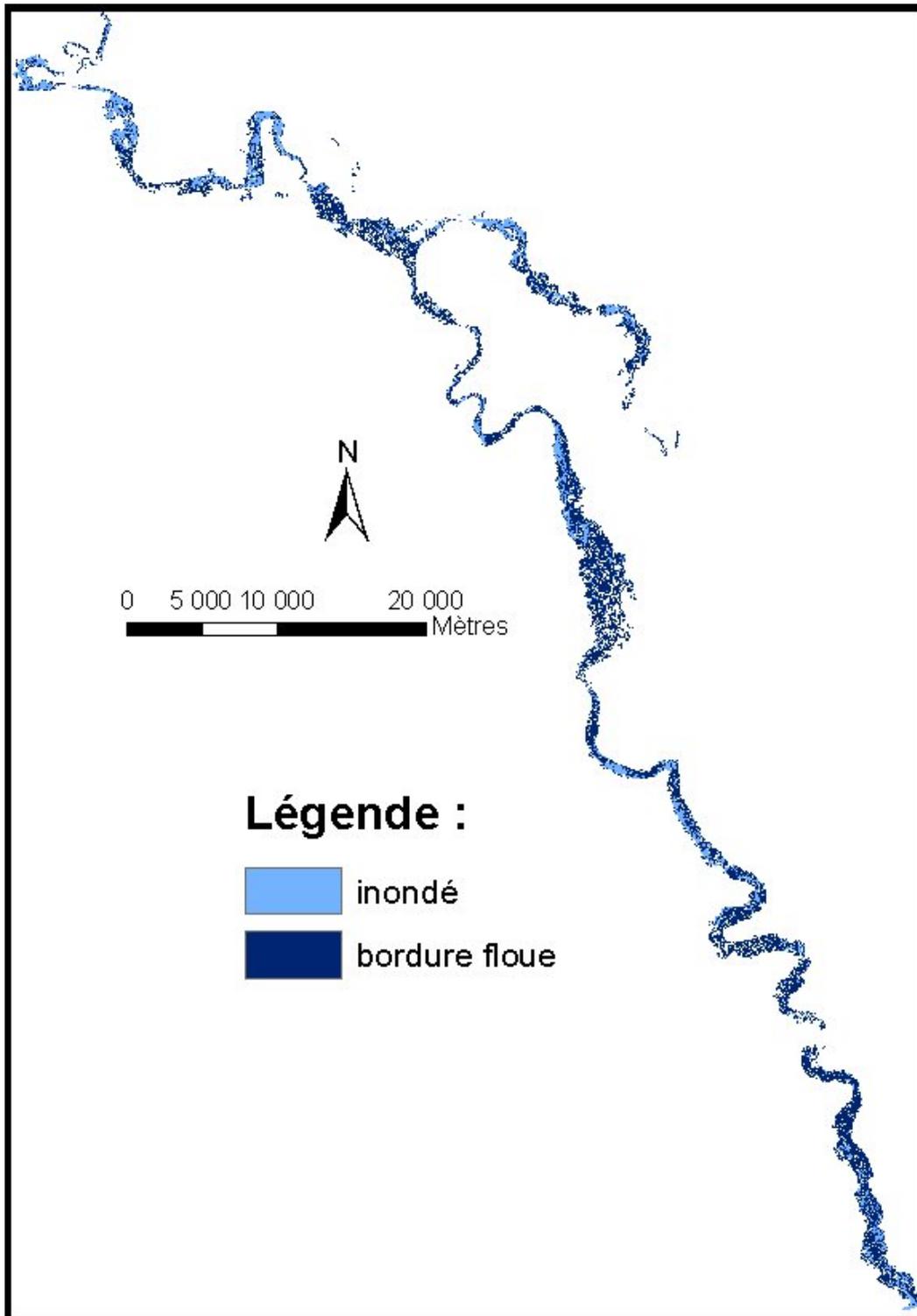


Figure A 3.7 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image satellitaire ERS-1 acquise le 15 janvier 1994 à 21h47 pour le site d'étude de la Meuse.

Annexe 4. Résultats complémentaires des évaluations des simulations Monte-Carlo pour le site d'étude de la Moselle.

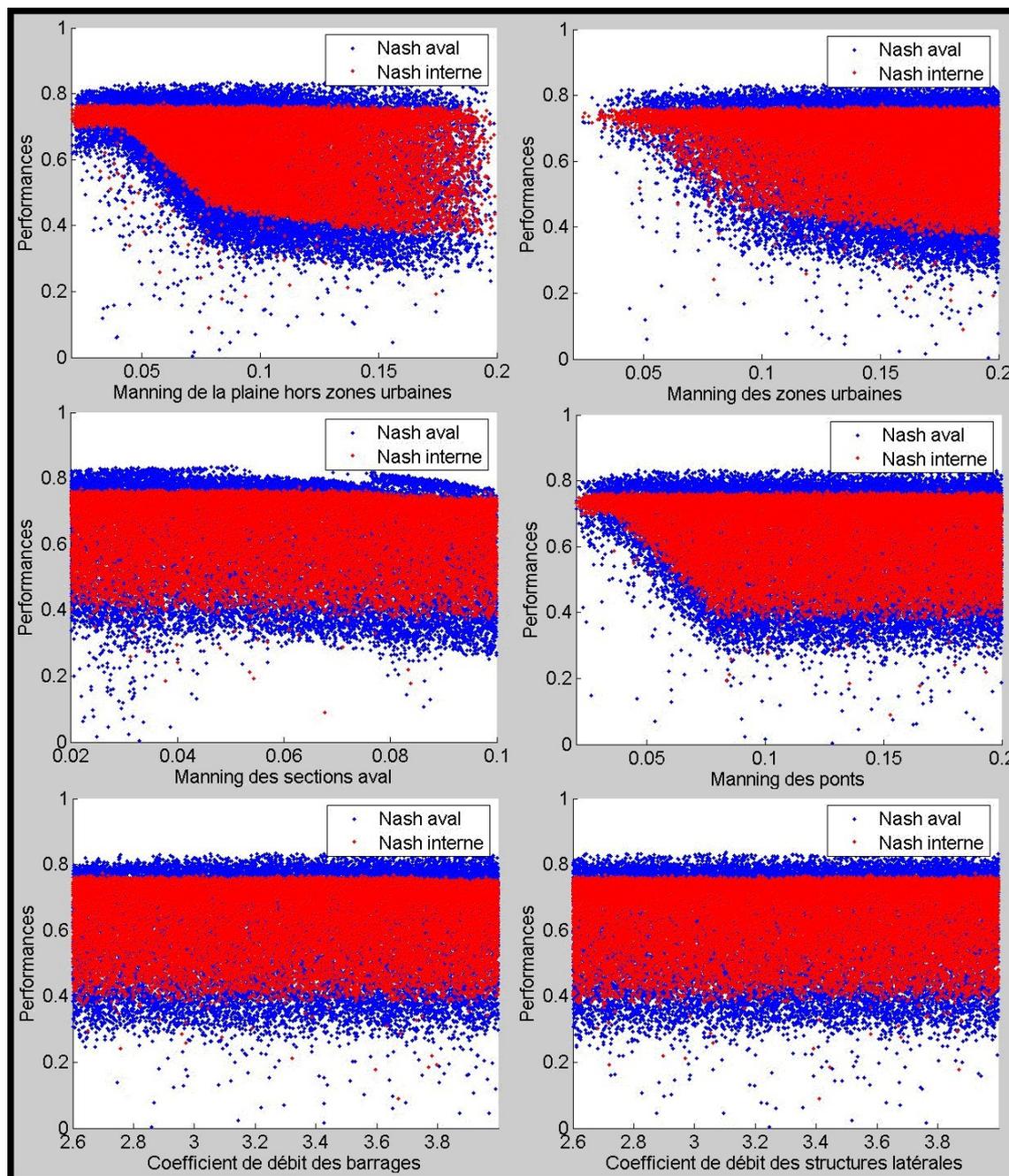


Figure A 4.1 : Résultat des évaluations des simulations Monte-Carlo suivant les critères de NASH pour le site d'étude de la Moselle.

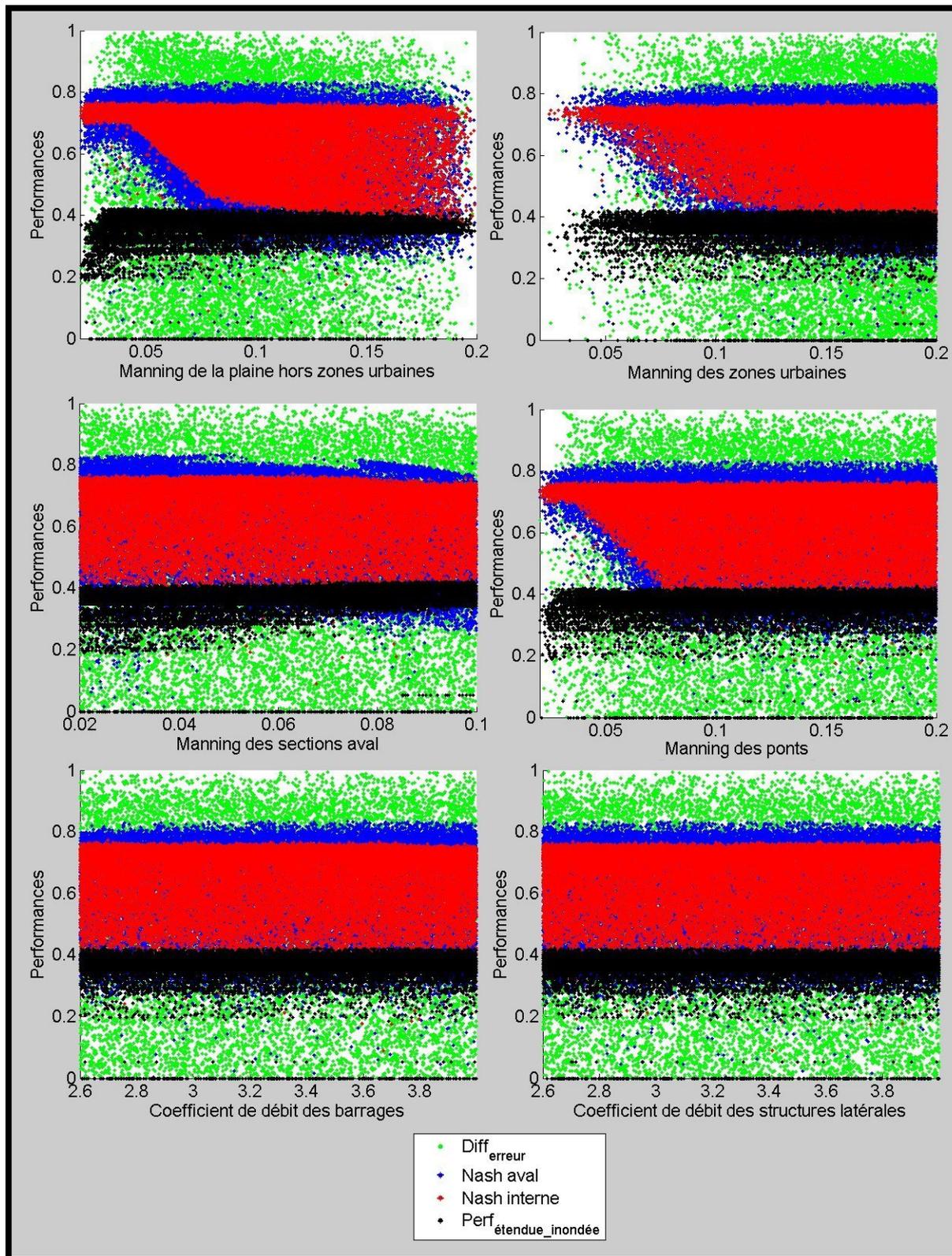


Figure A 4.2 : Résultat des évaluations des simulations Monte-Carlo suivant les critères de Nash et de performance sur les étendues inondées pour le site d'étude de la Moselle (hors Manning en lit mineur).

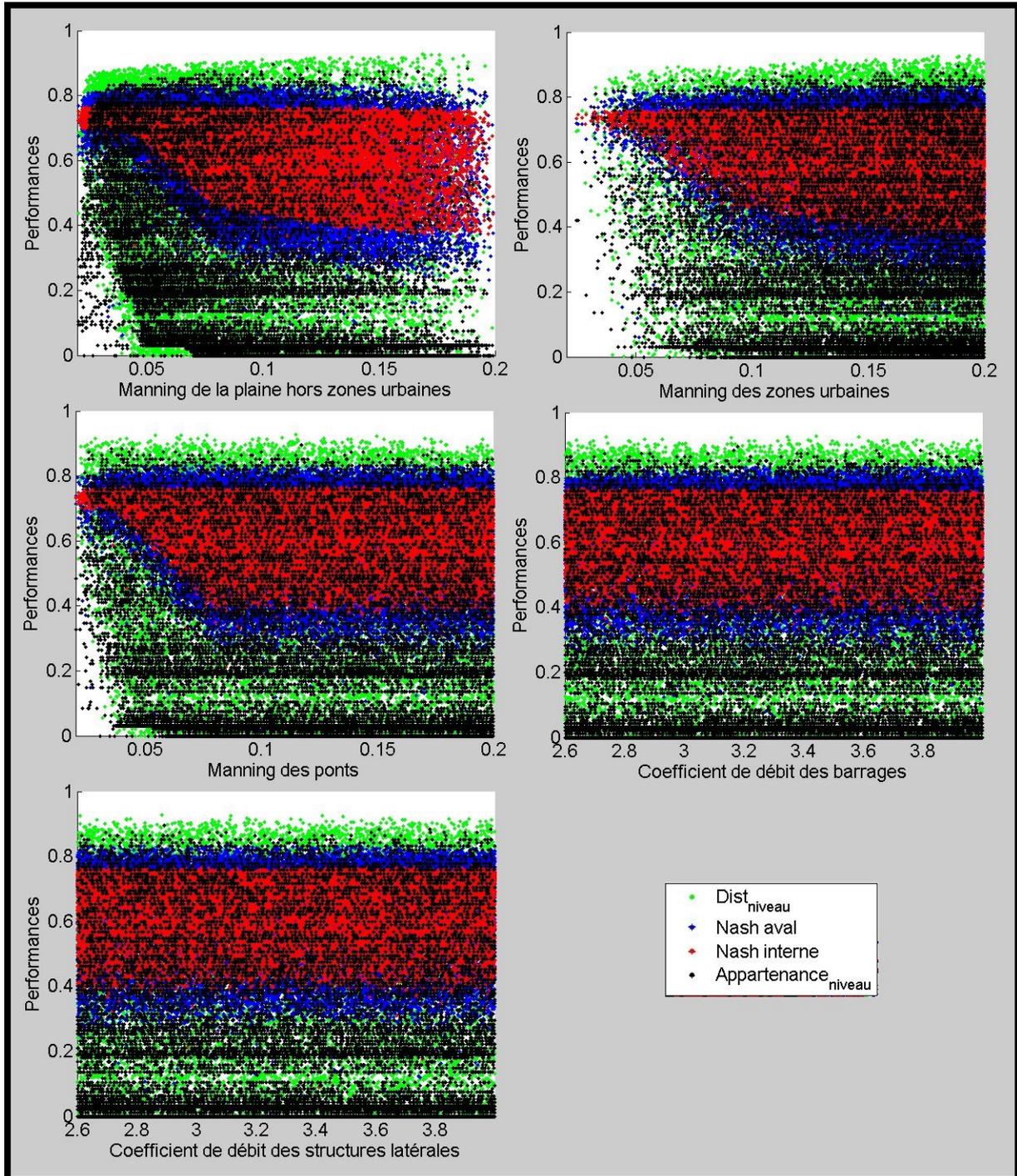


Figure A 4.3 : Résultats des évaluation des simulations Monte-Carlo suivant les critères de Nash et de performance sur les niveaux d'eau pour le site d'étude de la Moselle (hors Manning en lit mineur et sur les sections aval).

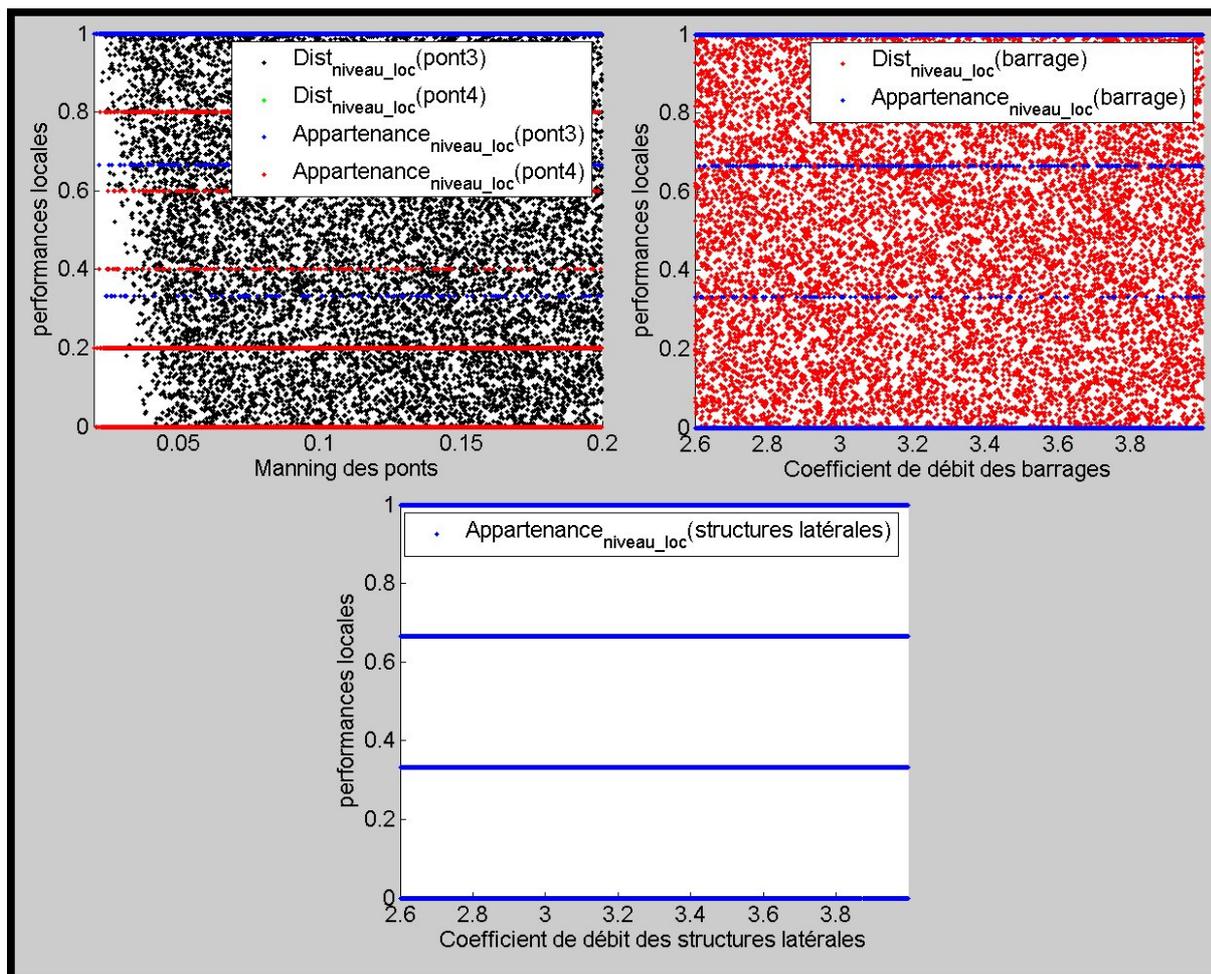


Figure A 4.4 : Résultats d'évaluation des simulations Monte-Carlo suivant les critères de performance des niveaux d'eau locaux et pour les casiers hydrauliques pour le site d'étude de la Moselle.

Annexe 5. Ordres de grandeur des coefficients de frottement de Strickler obtenus par M. Pradé.

Catégories, selon les études de Pardé	Coefficient de Strickler K_s
Petits cours d'eau de montagne, à fond très irrégulier, largeur de l'ordre de 10 à 30 mètres.	23 à 26
Cours d'eau de montagne larges de 30 à 50 mètres, avec pentes supérieures à 0,002 et fond de gros graviers (par exemple 10 à 20 centimètres de diamètre pour beaucoup d'entre eux).	27 à 29
Rivières de largeur comparable ou supérieure, à pente comprise entre 0,0008 et 0,002, avec fond de graviers dont le diamètre extrême en général ne dépasse pas 8 à 10 centimètres (Rhin à Bâle).	30 à 33
Pente comprise entre 0,0006 et 0,0008, graviers de 4 à 8 centimètres (Rhône à Lyon).	34 à 37
Même pente mais cailloux plus petits (Rhône à la porte de Scex avant le Léman).	38 à 40
Pente inférieure à 0,0006 et supérieure à 0,00025, cailloux très petits ou sable (Danube à Vienne).	41 à 42
Cours d'eau peu turbulents, avec pente de 0,00012 à 0,00025, fond de sable et de boue (Seine, Saône, Rhin inférieur).	43 à 45
Très gros cours d'eau à très faible pente (moins de 0,00012) et fond très lisse (Volga, Danube hongrois, Mississippi inférieur).	46 à 50

Tableau A 5.1 : Valeurs du coefficient de Strickler en fonction de la typologie du cours d'eau, d'après M. Pradé (Roux, 2004).

Annexe 6. Carte d'inondation obtenue à partir d'une image SPOT-4 pour le site d'étude de l'Hérault.



Figure A 6.1 : Image SPOT-4 acquise le 7 décembre 2003 à 10h40 sur le site d'étude de l'Hérault, affichée en fausses couleurs (R, V, B=PIR, R, V).

Pour estimer la qualité de la cartographie d'inondation à partir d'images satellitaires optiques, nous avons exploité une image SPOT 4 (capteur optique passif) de la crue de l'Hérault de décembre 2003. La carte d'inondation satellite a été comparée à l'étendue inondée obtenue par photo-interprétation sur les photographies aériennes au 15000^{ème}.

En raison de la phase de décrue avancée de l'Hérault à la date d'acquisition des photographies aériennes, la photo-interprétation de l'étendue inondée dans certaines zones de la plaine s'est avérée incertaine. En effet, sur certaines parties des photographies aériennes, il est délicat de déterminer s'il y a ou non présence de l'inondation. En conséquence, pour ne pas biaiser les résultats à cause d'une estimation de la surface inondée potentiellement erronée, deux zones d'intérêt A et B dans lesquelles l'extraction de l'eau par photo-interprétation est relativement aisée ont été sélectionnées. Ces deux zones d'intérêt ont des surfaces d'environ 3,5 km² et 4,5 km². Elles ont été de plus choisies avec des couvertures du sol représentatives de celles rencontrées dans la plaine de l'Hérault (vigne, sols nus, vergers, parcelles agricoles...).

Comme il a été annoncé dans le paragraphe 2.1.3, la signature spectrale de l'eau se distingue de celle des autres éléments dans le Proche InfraRouge (PIR) par une réponse très faible voire nulle.

Pour cartographier la zone d'inondation à partir de l'image satellitaire SPOT4, un seuillage radiométrique a été appliqué au canal Proche InfraRouge (PIR). La détermination du seuil est basée sur l'analyse de l'histogramme des radiométries dans le canal PIR de l'image SPOT4. En supposant que la seule couverture du sol avec des radiométries très faibles dans le PIR est l'eau (excepté les ombres et les routes larges), l'histogramme des radiométries dans le PIR est bimodal (2 pics), le premier pic (valeurs faibles) correspondant à la zone inondée. Il est important de noter que la taille des deux pics de l'histogramme est liée à la surface occupée par l'inondation relativement à la surface de l'image sur laquelle l'histogramme est calculé. Les valeurs situées entre les deux pics de l'histogramme correspondent donc potentiellement à des pixels inondés, non inondés, partiellement inondés ou inondés avec des objets émergés. Une valeur de seuil située entre ces deux pics implique nécessairement des sur-détections et des oublis dans la carte d'inondation satellitaire.

Dans notre approche, l'idée est d'équilibrer sur-détections et oublis. Dans une étude sur la cartographie de plans d'eau, (Puech, 1994) a montré qu'un seuillage à la valeur du minimum local entre les deux pics de l'histogramme bimodal permet d'équilibrer oublis et sur-détection si les deux pics ont des surfaces équivalentes. Pour « égaliser » les pics de l'histogramme, nous avons construit celui-ci à partir d'une zone de l'image SPOT4 dans laquelle les répartitions spatiales des surfaces inondées et non inondées sont équivalentes. L'histogramme des radiométries ainsi obtenu est présenté dans la Figure A 6.2.

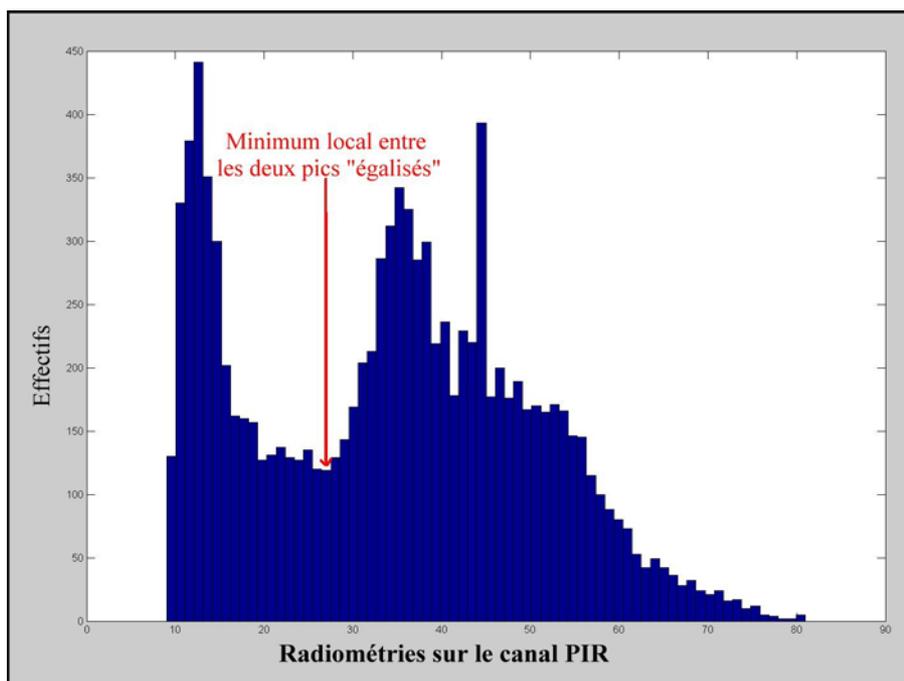


Figure A 6.2 : Histogramme du canal PIR d'une partie de l'image SPOT 4 pour laquelle la répartition surfaces inondées et non inondées est équivalente.

	Confusions et bonnes détections par rapport la carte PI	Carte d'inondation SPOT
Zone d'intérêt A	Détections correctes (%)	82
	Oublis (%)	18
	Sur détections (%)	10
Zone d'intérêt B	Détections correctes (%)	71
	Oublis (%)	29
	Sur détections (%)	30

Tableau A 6.1 : Termes de la matrice de confusion entre les étendues inondées observées sur l'image SPOT4 et sur les photographies aériennes (en pourcentage de la surface inondée photo-interprétée).

Dans le Tableau A 6.1, la carte d'inondation SPOT est comparée à la carte d'inondation photo-interprétée. La matrice de confusion pour la carte d'inondation SPOT par excès montre des pourcentages de bonnes détections et de sur-détections relativement acceptables sur la zone d'intérêt A. Les résultats moins bons sur la zone d'intérêt B sont principalement dus au fait que l'eau y est la plupart du temps recouverte de végétation partiellement inondée, ce qui rend sa détection plus délicate sur l'image SPOT en raison d'une résolution plus grossière que sur les photographies aériennes.

La Figure A 6.3 illustre géographiquement la comparaison entre carte d'inondation SPOT et carte photo-interprétée.

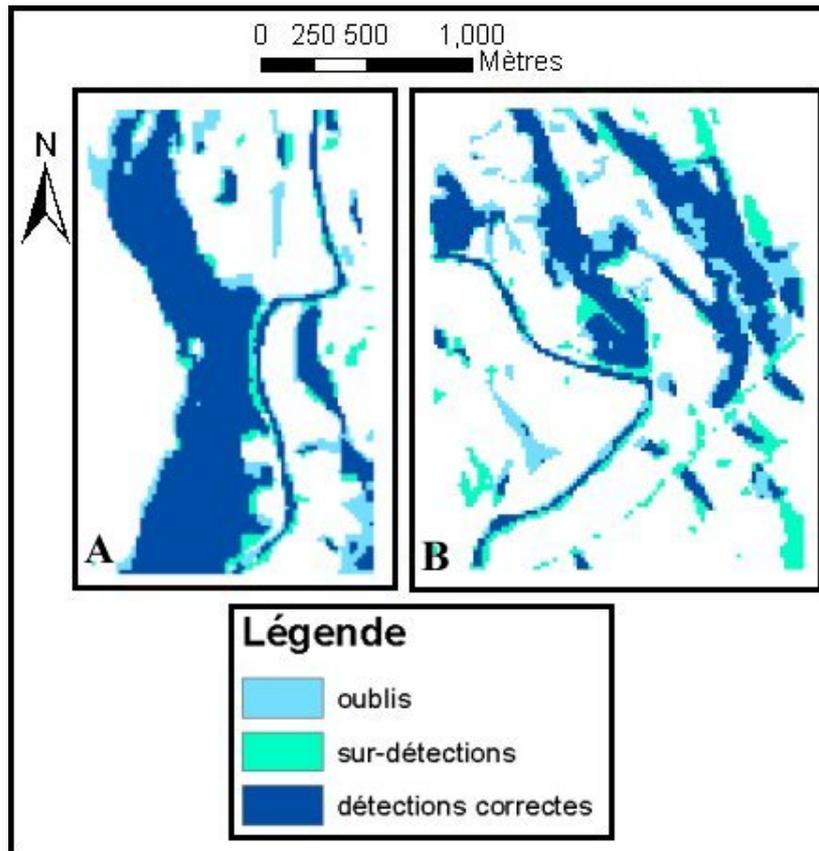


Figure A 6.3 A et B : Comparaison entre carte d'inondation SPOT4 par excès et carte photo-interprétée sur les photographies aériennes dans les zones d'intérêt A et B.

Le quotient de la surface mal classée (somme des sur-détections et des oublis) par la longueur des limites de l'étendue inondée (photo-interprétées sur les photographies aériennes) fournit une estimation de l'erreur moyenne de positionnement de la limite d'inondation à partir de l'image SPOT de l'ordre de 20m sur la zone d'intérêt.

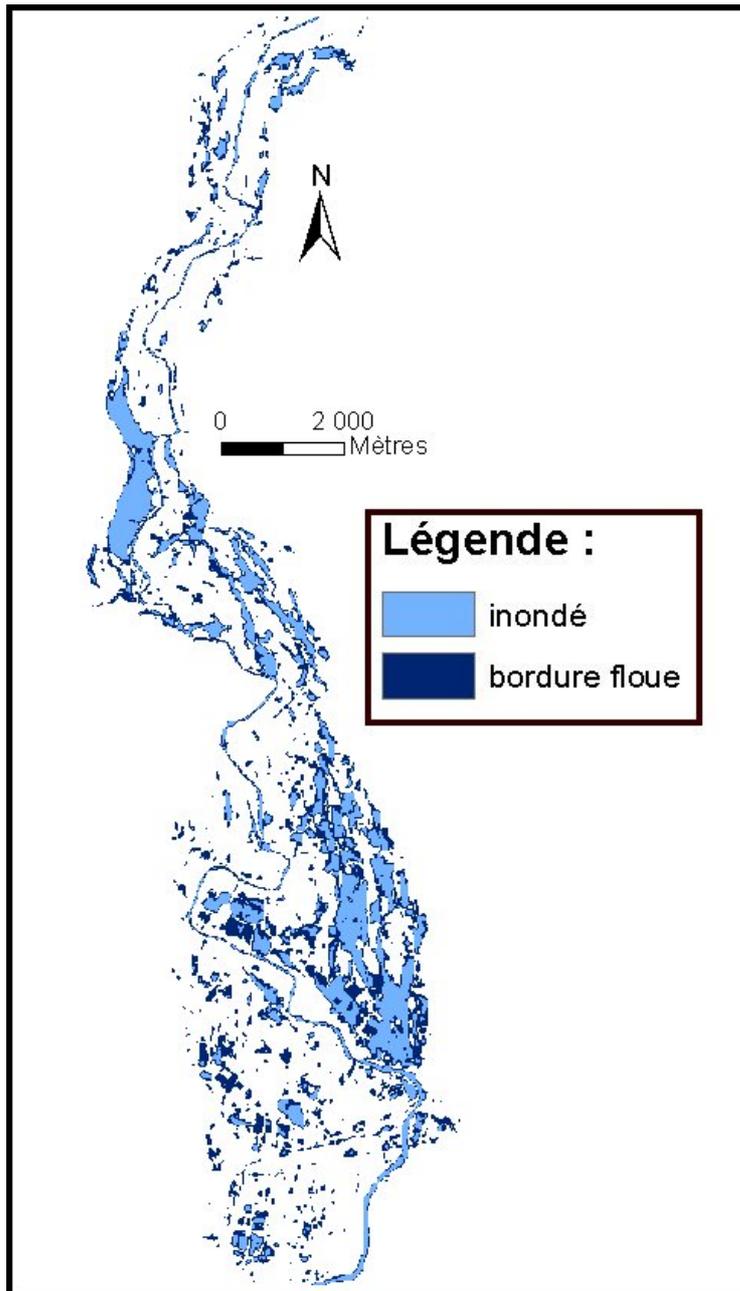


Figure A 6.4 : Carte d'inondation obtenue à partir de l'image SPOT-4 acquise le 7 décembre 2003 à 10h40 sur le site d'étude de l'Hérault.

Résumé :

Ce travail vise à étendre les méthodes d'analyse d'images satellitaires de crues au-delà de la détection des limites d'inondation afin d'estimer des niveaux d'eau distribués dans l'espace et d'aider la modélisation hydraulique.

Inspirée des travaux de Raclot (2003) sur photographies aériennes qui fournissent des incertitudes moyennes de $\pm 20\text{cm}$, la méthode d'estimation des niveaux d'eau utilise des images satellitaires RADAR de crue et un MNT fin. Elle repose sur 1) une phase de télédétection pour cartographier l'inondation et analyser la pertinence de ses limites pour l'estimation des niveaux d'eau, 2) une phase d'analyse spatiale dans laquelle les niveaux d'eau sont estimés par croisement entre les limites pertinentes et un MNT fin, puis contraints par le schéma de circulation des eaux. Les estimations de niveaux d'eau obtenues ont une incertitude moyenne de $\pm 38\text{cm}$ pour une image RADARSAT-1 d'une crue de la Moselle (France, 1997). Des travaux de validation ont permis de calculer une RMSE de l'ordre de 13cm pour une image ENVISAT de l'Alzette (Luxembourg, 2003).

Pour aider la modélisation hydraulique, la démarche proposée vise à réduire le phénomène d'équifinalité grâce aux images satellitaires. Pour cela, un calage « traditionnel » à partir d'hydrogrammes observés est complété par la comparaison entre résultats du modèle et surfaces inondées ou niveaux d'eau extraits des images. Pour cerner les incertitudes du calage, des simulations Monte-Carlo ont été mises en place. En perspective, la prévision de l'évolution d'une crue après acquisition d'une image devrait bénéficier de modèles mieux contraints grâce à l'utilisation des images comme condition initiale ou donnée de calage.

Mots clés : Télédétection spatiale, inondation, cohérence hydraulique, Modèle Numérique de Terrain (MNT), modélisation hydraulique, équifinalité, simulations Monte-Carlo.

Abstract:

The Thesis aims at deploying methods of flood satellite image analysis beyond 2D flood area delineation in order to estimate water levels and to help hydraulic modelling.

Based on Raclot (2003) works with aerial photographs, which provide $\pm 20\text{cm}$ mean uncertainty, the water level estimation method uses satellite RADAR images of flood and a fine DEM. The method is composed of two steps : i) flood cartography and analysis of image hydraulic relevance for water level estimation, ii) fusion between relevant information resulting from the image with a fine Digital Elevation Model (DEM) and constraining the water levels extracted from image by concepts of coherence with respect to a hydraulic flow through a plain. It provides water level estimations with a $\pm 38\text{cm}$ mean uncertainty for a RADARSAT-1 image of a Mosel Flood (1997, France). In addition, validation works with an ENVISAT image of an Alzette river flood (Luxembourg, 2003) allowed us to calculate a Root Mean Square Error of 13 cm on the estimates of water levels.

To help hydraulic modelling, the PhD aims at reducing equifinality thanks to satellite images of flood. To meet this aim, a “traditional” step of calibration thanks to hydrographs is completed by comparison between simulation results and flood extends or water levels extracted from images. To deals with calibration uncertainties, Monte-Carlo simulations have been used. In perspective, the results of the thesis imply great benefits for flood evolution forecasting after acquisition of flood satellite images because the use of these images as initial conditions or calibration data provide better-constrained models.

Key words: satellite remote sensing, flood, hydraulic coherence, Digital Elevation Model (DEM), hydraulic modelling, equifinality, Monte-Carlo simulations.