Télédétection, 2006, vol. 6, n° 4, p. 325-343
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

ESTIMATION DE NIVEAUX D'EAU EN PLAINE INONDÉE À PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES RADAR ET DE DONNÉES TOPOGRAPHIQUES FINES

Renaud HOSTACHE[1], Christian PUECH[1], Guy SCHUMANN[2] et Patrick MATGEN[2]

[1] *UMR TETIS CEMAGREF - CIRAD – ENGREF, Maison de la Télédétection*
500, rue J.F. Breton, 34093, Montpellier, Cedex 5, France
Téléphone : 0033 4 67 54 87 19 ou 0033 4 67 54 87 45 ; télécopieur : 0033 4 67 54 87 00 ;
courriel : renaud.hostache@gmail.com ou puech@teledetection.fr

[2] *CRP Gabriel Lippmann, 41, rue du Brill, L-4422 Belvaux, Grand-Duché du Luxembourg*
Téléphone : 00352 470261-417 ou 00352 470261-461 ; télécopieur : 00352 470264 ;
courriel : schumann@lippmann.lu ou matgen@lippmann.lu

Soumis le 5 juin 2006 ; révisé le 24 octobre 2006 ; accepté le 26 mars 2007

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans une démarche de valorisation des images satellitaires, prises lors d'une crue des eaux, tant pour la caractérisation tridimensionnelle fine de l'aléa inondation que pour l'aide à la modélisation hydraulique. L'objectif est de développer une méthode qui montre l'intérêt d'utiliser des images satellitaires radar pour identifier les niveaux d'eau dans une plaine inondée au moment de la prise d'image. L'approche méthodologique proposée comprend trois étapes : 1) cartographie de l'étendue des eaux à partir d'images radar et extraction des bordures informatives de cette carte de la zone inondée, 2) estimation primaire des niveaux d'eau par croisement de ces bordures informatives avec un modèle numérique d'altitude (MNA), 3) réduction de l'incertitude dans l'évaluation du niveau d'eau par l'introduction et la mise en application de concepts de cohérence hydraulique. Grâce à cette méthode, une estimation des niveaux d'eau a pu être obtenue avec une demi-incertitude de 40 cm de hauteur à l'aide d'une image RSO de RADARSAT-1 (taille du pixel 12,5 cm), couplée à un MNA constitué à partir du traitement photogrammétrique de photographies aériennes à 1 : 8 000, sur un tronçon de 15 km de la rivière Moselle, entre Thionville et Berg sur Moselle. Par ailleurs, une validation a été faite avec une image du capteur radar d'ENVISAT (taille du pixel 12,5 m), prise lors d'une crue de l'Alzette dans le Grand-Duché du Luxembourg. Cette validation a permis de calculer une erreur quadratique moyenne de 13 cm sur l'estimation des niveaux d'eau.

Mots-clefs : inondation, niveau d'eau, images radar, MNA, cohérence hydraulique.

ESTIMATION OF WATER LEVELS IN A FLOODPLAIN USING SATELLITE RADAR IMAGES AND FINE TOPOGRAPHIC DATA

The objective of the work presented in this paper is to show the usefulness of remote sensing images acquired during a flooding event for the tridimensional spatial characterization of flood hazard as well as hydraulic modeling support. The overall objective is to develop a method showing the interest of satellite radar images for identifying water level spatial distribution in a floodplain at the time of image acquisition. The proposed methodology is organized into three principal stages : 1) cartography of flood extent based on radar images and the extraction of the flood extent limits, which are relevant for water level estimation ; 2) primary estimation of water levels by matching the relevant limits to a fine digital elevation model (DEM) ; 3) minimization of estimation uncertainties in water levels by the introduction of hydraulic coherence concepts. Based on this method, estimates of water levels have been obtained with a half-uncertainty of 40 cm in height using a RADARSAT-1 SAR image (pixel spacing 12,5 cm) coupled to a DEM derived from the photogrammetric processing of aerial photographs (scale 1 : 8 000), over a 15 km section of the Mosel river between Thionville and Berg sur Moselle. In addition, validation using an ENVISAT radar image (pixel spacing 12,5 m) of an Alzette river flood (Grand-Duchy of Luxembourg) allowed us to calculate a Root Mean Square Error of 13 cm on the water level estimates.

Key words : flood, water levels, radar imagery, high resolution DEM, hydraulic coherence.

1. INTRODUCTION

Les capteurs satellitaires radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont très utiles dans le cadre de la gestion des inondations (Gumley and King, 1995 ; Guo, 2000 ; Moore and North, 1974), car ils offrent des observations spatialisées des zones inondées avec une haute résolution spatiale. De plus, contrairement aux capteurs optiques, ils ont la capacité d'acquérir des images de jour comme de nuit, même à travers un couvert nuageux important (Henry, 2004).

La principale exploitation des images satellitaires radar acquises lors d'une crue demeure aujourd'hui la cartographie de l'aléa inondation. En particulier, dans le cadre de la Charte espace et catastrophes majeures, certains organismes (par exemple le Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection–SERTIT- à Strasbourg, France) proposent des services de cartographie rapide des zones inondées à partir d'images satellitaires prises lors de crues (Yésou *et al*., 2000).

Cependant, la cartographie des zones inondées 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 prises lors d'inondations sont riches d'informations, au-delà des cartes des zones inondées. En effet, elles peuvent être très profitables à la gestion des inondations et, en particulier, à la modélisation hydraulique. Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans ce contexte et visent à compléter la cartographie des zones inondées à partir d'images satellitaires par l'estimation des niveaux d'eau en plaine inondée. L'objectif final attendu est l'aide à la modélisation hydraulique.

Les études concernant la gestion et la compréhension des inondations en plaine inondable, dans un but de prévision ou de prévention des crues, ont la plupart du temps recours à des modèles hydrauliques. Pour être fiables, les modèles hydrauliques doivent être contraints, par exemple par le biais d'un calage (Vidal, 2005), grâce à des connaissances concernant la crue (niveaux d'eau, volumes transitant dans la plaine au moment du passage de la crue, etc.). Cependant, ces données sont la plupart du temps difficiles à acquérir sur le terrain (Aronica *et al*., 1998 ; Pappenberger *et al*., 2005b). Pour pallier ce manque de données, une solution serait d'exploiter des niveaux d'eau en période d'inondation estimés à partir d'images satellites radar.

Brakenridge *et al*. (1998) ont estimé des niveaux d'eau par croisement entre des limites de zones inondées extraites d'images satellitaires RSO d'ERS (taille du pixel 12,5 m, bande C, polarisation VV) et de cartes topographiques. Cependant, l'incertitude de 1 à 3 m obtenue sur l'estimation des niveaux d'eau n'est pas compatible avec la précision requise dans le cadre de la modélisation hydraulique. Raclot (2003) est parvenu à une demi-incertitude de l'ordre de ± 20 cm dans l'estimation des niveaux d'eau, grâce à un algorithme de mise en cohérence hydraulique, appliqué sur des estimations primaires de niveaux d'eau provenant du croisement entre des informations extraites de photographies aériennes et un modèle numérique d'altitude (MNA) fin. En conséquence, nous proposons de combiner ces deux approches afin d'estimer les niveaux d'eau à partir d'une image satellitaire radar avec une précision adaptée à la modélisation hydraulique.

La méthodologie d'estimation des niveaux d'eau en plaine inondée proposée dans cet article comprend trois étapes. Dans la première étape, on analyse une image satellitaire radar prise en période de crue afin d'en extraire la limite de la zone inondée pertinente pour une estimation du niveau d'eau. Elle est basée sur une épuration de l'information fournie par l'image radar concernant la présence où l'absence de l'inondation, ne conservant que sa partie utile pour une estimation des niveaux d'eau. La deuxième étape est basée sur un croisement de la limite pertinente de la zone inondée obtenue à l'issue dans l'étape précédente, avec des données topographiques à haute résolution spatiale. Des estimations primaires de niveaux d'eau sont obtenues, et ceci de façon indépendante. Dans une troisième étape, nous proposons la mise en application d'un algorithme de resserrement de l'incertitude dans l'estimation des niveaux d'eau qui repose sur le principe de décroissance de la charge hydraulique de l'amont vers l'aval. Il met en dépendance spatiale les niveaux d'eau pour atteindre une « cohérence hydraulique ». Développé par Raclot (2003) à l'aide de photographies aériennes prises lors d'une inondation, il est ici adapté pour des niveaux d'eau extraits d'images satellitaires radar.

En perspective, l'objectif est d'intégrer les estimations des niveaux d'eau resserrées dans les modèles hydrauliques, par exemple comme donnée de calage ou de condition initiale.

2. SITE D'ÉTUDE ET CONSTITUTION D'UNE BANQUE DE DONNÉES

2.1. Site d'étude

L'étude porte sur un tronçon de 15 km de la plaine aval de la Moselle, en France, entre Thionville et Berg sur Moselle, près de la frontière franco-germano-luxembourgeoise (figure 1). À cet endroit, la Moselle a un bassin versant d'environ 11 000 km^2, la vallée a une largeur moyenne de 5 km et la rivière a un parcours sinueux à méandres avec un niveau d'aménagement important. Elle se termine par des gorges à la hauteur de Berg sur Moselle. En période de crue, les gorges agissent comme un goulot d'étranglement, qui freine l'écoulement. La plaine agit alors comme une zone de rétention naturelle de grande surface.

En raison de sa représentativité des inondations de plaine, ce site d'étude a déjà fait l'objet de travaux dans le cadre de projets européens NOAH (New Opportunities for Altimetry in Hydrology) (NOAH, 2000) et nationaux PACTES (Prévention et anticipation des crues à l'aide des techniques spatiales) (Puech *et al*., 2002), dans lesquels on a analysé le potentiel des données spatiales (images HRV de SPOT en particulier) dans le cadre des modélisations hydrologiques et hydrauliques, en lien avec les inondations. Ceci montre l'intérêt d'analyser cette catégorie de cours d'eau pour des méthodes largement généralisables. Données de télédétection

L'image radar (figure 2) utilisée dans cette étude a été acquise, à 5 h 57 le 28 février 1997, par le capteur satellitaire RSO de RADARSAT-1 (orbite descendante, faisceaux standards S2), pendant une crue de durée de retour de l'ordre de 4 ans. Ce capteur RSO 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 puisque l'eau libre, d'apparence lisse, présente une rétrodiffusion très faible en raison de la réflexion spéculaire. Cependant, en présence de vent ou de fortes précipitations, les vaguelettes générées peuvent rendre l'eau libre rugueuse vis-à-vis du signal radar et augmenter sa rétrodiffusion, en particulier si ces vaguelettes ont des dimensions verticales supérieures à 2,8 cm -critère de Rayleigh (Ulaby and Dobson, 1989)- dans le cas du capteur RSO. Au moment de l'acquisition de l'image, la vitesse du vent étant modérée (7 $m.s^{-1}$ à l'aéroport de Metz, donnée de Météo-France), nous avons supposé que les effets du vent sur l'eau libre sont négligeables.

En amplitude, l'image RSO possède une taille de pixel de 12,5 m, résultat de l'échantillonnage d'une image complexe de résolution spatiale de l'ordre de 25 à 30 m. Les relevés limnigraphiques indiquent que la prise de vue a eu lieu quelques heures après le passage du pic de crue, soit à 8 h à l'aval et à 15 h à l'amont de la zone d'étude, donc en début de la période de décrue. Notons que la vitesse de propagation du pic de crue dans la plaine de la Moselle est lente, de l'ordre de 2 $km.h^{-1}$.

Cinq photographies aériennes prises par l'IGN, en 1999, hors de la période de crue ont été acquises ; elles sont à 1 : 15 000 et couvrent la totalité de la plaine de la Moselle dans la zone d'étude. Elles sont destinées à cartographier l'ensemble des zones urbaines et végétalisées (végétation haute : forêts, arbres isolés, haies, etc.) dans la plaine inondable.

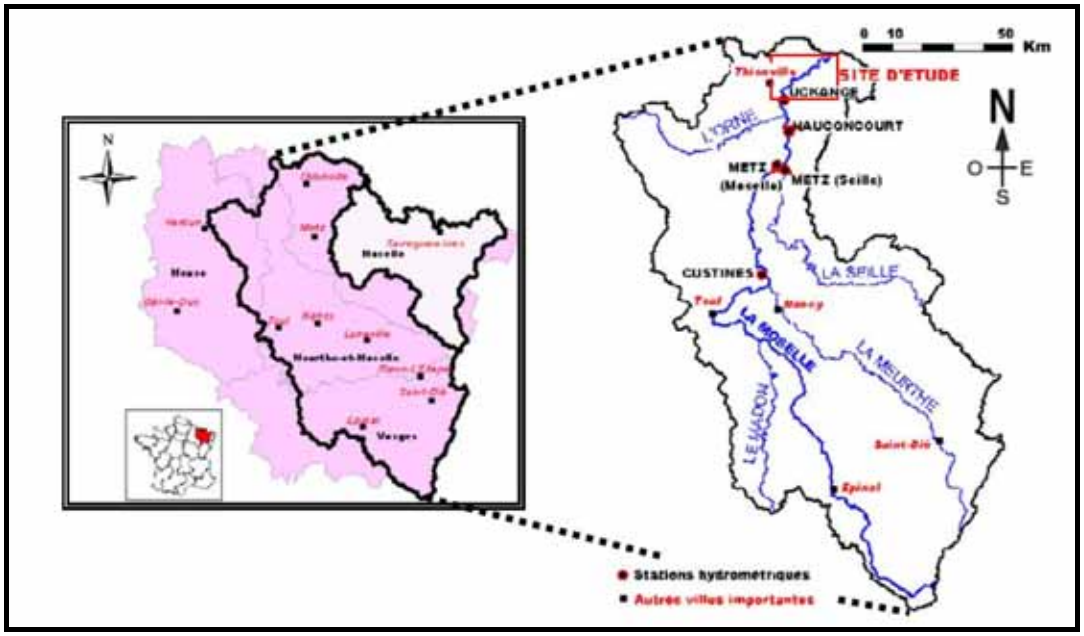


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la partie française de la Moselle et du site d'étude. *Location of the French part of the Mosel river basin and of the study area.*

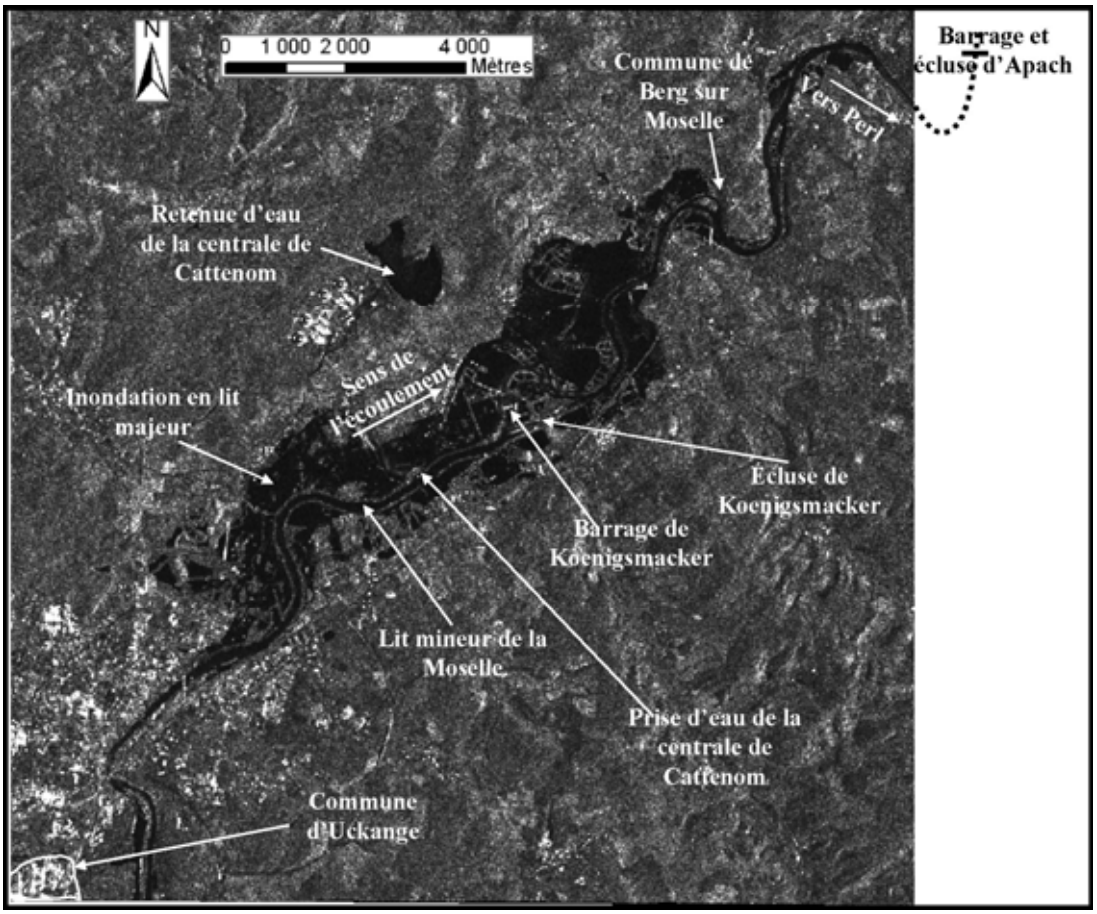


Figure 2 : Localisation du site d'étude sur l'image RSO de RADARSAT-1 du 28 février 1997. *Location of the study area on the RADARSAT-1 SAR image acquired on February 28th 1997.*

2.2. Données topographiques et création d'un modèle numérique d'altitude

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 à 1 : 8 000. 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 des lignes est irrégulière. Elle est d'autant plus importante que la variation de l'altitude est forte (la plus petite distance entre deux points est de l'ordre de 60 cm). Les lignes représentent des courbes de niveau et des éléments topographiques de la plaine (par exemple digues, talus, gravières, routes, voies ferrées, etc.). L'incertitude altimétrique moyenne des données brutes est de l'ordre de ± 25 cm (informations des SNNE).

À partir des données topographiques brutes, nous avons produit un MNA en réseau de triangles irréguliers (TIN), par une interpolation linéaire entre les points et les lignes cotés sur des facettes triangulaires construites suivant le critère de Delaunay (Puech, 2000). Le TIN a ensuite été converti au format matriciel (image) pour pouvoir être superposé aux données-images. La résolution spatiale de 7 m choisie pour le MNA a été définie conformément au théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon (Nyquist, 1928 ; Shannon, 1949), inférieure à la moitié de la taille du plus petit élément topographique représenté par les données brutes (~ 15 à 20 m). Dans la suite de l'article, le sigle MNA désignera les données topographiques interpolées au format matriciel.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La méthode présentée dans cet article vise à fournir des informations utiles à la modélisation hydraulique et, en particulier, à estimer les niveaux d'eau dans une plaine inondée à partir d'une image RSO acquise lors d'une crue. L'idée sous-jacente dans l'ensemble de la méthode consiste à extraire et à retenir, à chaque étape, la partie la plus certaine et la plus pertinente des différentes sources d'information. C'est un des points les plus importants et les plus originaux de la méthode. En effet, sans cet effort, comme l'annoncent Lane *et al*. (2003), l'information sur le niveau d'eau qu'il est possible d'extraire à partir

d'images RSO est très incohérente vis-à-vis de la topographie et beaucoup trop incertaine pour une application en hydraulique fluviale.

La méthode est structurée en trois étapes : 1) cartographie de l'extension des eaux à partir d'une image radar et extraction des bordures pertinentes pour une estimation du niveau d'eau, 2) estimation primaire des niveaux d'eau par croisement entre les bordures pertinentes et un MNA, 3) réduction de l'incertitude dans l'estimation des niveaux d'eau par mise en cohérence hydraulique.

3.1. Cartographie de la zone inondée et extraction des bordures pertinentes pour une estimation du niveau d'eau

3.1.1 Pré-traitements des données radar

Pour pouvoir être superposées avec d'autres sources de données, par exemple un MNA, les images RSO doivent être géopositionnées. Dans notre étude, l'image RSO de RADARSAT-1 a été géopositionnée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), au moyen de points d'amer, puis par transformation polynomiale d'ordre 2. Les points d'amer ont été saisis grâce à une carte de l'IGN à 1 : 25 000. Grâce à la numérisation de points de contrôle (10 points répartis sur l'ensemble de la zone d'étude), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) à la suite du géopositionnement a pu être estimée à environ 10 m, valeur inférieure à la dimension d'un pixel de l'image.

Par ailleurs, les images radar sont soumises aux effets du chatoiement (*speckle* : bruit inhérent aux capteurs radar) (Ulaby and Dobson, 1989), ce qui rend parfois leur interprétation difficile sans traitements préalables (Bruniquel and Lopes, 1997). Pour cartographier l'eau libre, le chatoiement peut être pénalisant. Un filtrage temporel (Gineste, 1998), un filtrage spatial (Lopes *et al*., 1993) ou une combinaison des deux permet de réduire les effets du chatoiement, mais le principal inconvénient des filtres spatiaux est de dégrader la résolution spatiale des images. Dans notre cas, deux arguments militent pour ne pas employer de filtrage : 1) l'histogramme de la radiométrie de l'image RSO est nettement bimodal, ce qui implique une discrimination assez aisée de l'eau (figure 3) ; 2) un des objectifs de l'étude est une délimitation de la zone inondée la plus précise possible, ce qui implique d'éviter les traitements qui dégradent la résolution spatiale de l'image. En conséquence, aucun filtrage n'a été appliqué sur l'image RSO.

3.1.2 Classification « eau-non eau » sur l'image

Les capteurs radar ont une forte sensibilité à la constante diélectrique et à la rugosité de surface des objets observés (Ulaby *et al*., 1996). Si on fait l'hypothèse qu'une surface d'eau libre a une rugosité très faible (Henry, 2004), celle-ci se comporte comme un réflecteur spéculaire : l'eau se distingue donc avec une rétrodiffusion très faible sur les images. Cette hypothèse est valable en l'absence d'effet de la rugosité dû au vent.

Pour extraire les pixels d'eau dans une image RSO, une méthode simple et robuste est le seuillage radiométrique (Henry, 2004), séparant les valeurs supérieures ou inférieures à un seuil donné. À la vue de l'incertitude liée à la présence de pixels mixtes, partiellement inondés, en bordure de la zone inondée, on a choisi de cartographier la zone inondée avec des limites floues. Plus exactement, un double seuillage radiométrique est appliqué à l'image (figure 3) :

- un seuillage par défaut, basé sur une valeur S_{min}, séparant les pixels totalement inondés du reste de l'image (terre et pixels partiellement inondés) ;
- un seuillage par excès, basé sur une valeur S_{max}, séparant les pixels en eau (partiellement ou totalement) du reste de l'image.

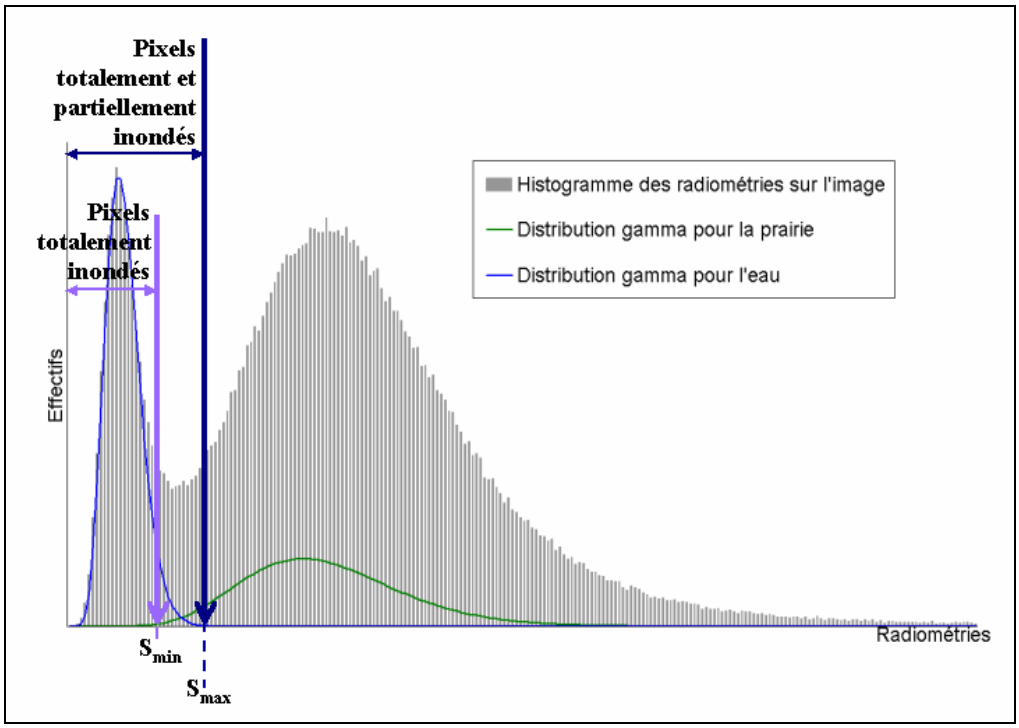


Figure 3 : Illustration du double seuillage sur l'histogramme des radiométries de l'image RSO. *Representation of "double" thresholding on histogram of SAR image radiometry.*

La détermination des valeurs S_{min} et S_{max} résulte de l'analyse des histogrammes de la rétrodiffusion des principales catégories d'occupation des terres sur l'image RSO.

Pour le S_{min}, l'analyse utilise la moyenne de la rétrodiffusion de la prairie et l'ENL (*Equivalent Number of Looks*) de l'image, estimé à partir du coefficient de variation de la radiométrie sur une zone forestière uniforme. Le cas des prairies est intéressant dans la mesure où 1) ce sont des zones à faible pente, donc les plus utiles a priori pour une estimation du niveau d'eau ; 2) leur rétrodiffusion est une des plus faibles rencontrées sur une image radar, excepté celle de l'eau libre. En conséquence, les pixels de l'image dont la rétrodiffusion est plus faible que celle de la prairie correspondent à de l'eau libre. Conformément à une hypothèse couramment utilisée (Henry, 2004), nous avons supposé que la distribution statistique de la rétrodiffusion de la prairie suit une loi Gamma dont les paramètres sont calculés à partir de l'ENL de l'image et de la moyenne de rétrodiffusion des pixels de prairie non inondés. Nous avons considéré que le quantile 1 % de cette loi donnait une bonne séparation entre les pixels d'eau libre et le reste de l'image.

Pour définir S_{max}, il faut s'intéresser à la détection des pixels partiellement inondés, sachant que leur radiométrie dépend de la catégorie d'occupation des terres présente en bordure de la zone inondée. Dans les cas simples, en l'absence d'une réflexion multiple, la combinaison entre la réponse de l'eau libre et celle du reste du pixel conduit à une rétrodiffusion au prorata des surfaces en eau libre. La recherche du seuil S_{max} est alors basée sur l'idée de repérer les pixels où, globalement, moins de la moitié de la surface est en eau, en utilisant le thème « prairie » comme représentatif de la zone émergée. Si on analyse au préalable la rétrodiffusion moyenne de l'eau libre (σ_{eau}, calculée à partir des pixels d'eau permanente, soit lacs, plans d'eau de gravières, lit mineur de la rivière), d'une part, et des prairies non inondées (σ_{pr}), d'autre part, on peut estimer une radiométrie seuil par la moyenne de ces deux valeurs, soit : $S_{max} = \frac{(\sigma_{eau} + \sigma_{pr})}{2}$.

Pour l'image RSO, nous avons retenu les valeurs : S_{max} = -12 dB et S_{min} = -15 dB.

À la suite du double seuillage, on obtient une carte de la zone inondée à trois thèmes : 0 = terre, 1 = eau et 2 = mixte. La zone incluse entre les bordures définit une limite floue de la zone inondée, qui traduit l'incertitude dans la délimitation de l'étendue inondée due à la présence de pixels partiellement inondés sur l'image RSO (figure 4A).

3.1.3 Élimination des zones non pertinentes

Toutes les parties de l'image RSO ne sont pas pertinentes : erreurs de détection de la zone inondée et zones inutiles pour une estimation du niveau d'eau.

Toute cartographie par seuillage radiométrique sur les images RSO fait apparaître des erreurs de détection (zones de sur-détection ou oublis) (Horritt, 2000). Les zones de sur-détections correspondent à des zones déclarées inondées sur la carte de la zone inondée, mais qui ne le sont pas dans la réalité. Elles se rencontrent principalement hors de la zone inondée et proviennent principalement d'effets dus au chatoiement et au relief. Les effets dus au chatoiement, qui concernent des groupes de pixels isolés hors de la zone inondée, peuvent être supprimés par filtrage surfacique. Les versants pentus du terrain naturel peuvent échapper à l'onde radar incidente émise par le capteur ; ils sont identifiables grâce au plan des pentes et à l'azimut du terrain naturel sur un MNA (fonctions programmées dans les SIG). La plupart des zones de sur-détection peuvent donc être corrigées.

Les zones d'oublis sont des zones déclarées non inondées sur la carte de la zone inondée, mais qui sont en réalité inondées. En l'absence d'effets dus au vent, elles proviennent d'éléments qui masquent l'eau (par exemple des arbres ou des bâtiments émergés). À partir de l'image RSO, il n'est pas possible d'identifier les zones d'oublis. Par contre, il est possible de cartographier les zones dans lesquelles ils sont susceptibles de se produire. En effet, les zones d'arbres et de bâtiments sont identifiables à l'aide de documents auxiliaires à très haute résolution spatiale concernant l'occupation des terres (e.g. : des photographies aériennes prises en dehors des périodes de crue).

Enfin, la problématique de la méthode étant l'estimation du niveau d'eau par croisement entre la limite de la zone inondée et un MNA fin, une précision acceptable sur le niveau d'eau ne pourra être obtenue que dans des zones raisonnablement planes, hors des infrastructures, gorges, etc. En conséquence, nous proposons d'éliminer de l'image RSO toutes les zones à forte pente, notamment au droit de certains éléments topographiques (talus, digues, routes et voies ferrées surélevées). De plus, les eaux dites permanentes (plan d'eau de gravières, lacs et lit mineur des cours d'eau) doivent être éliminées. En effet, la présence d'eau dans ces zones n'est pas nécessairement liée au débordement des eaux et ne fournit pas d'information utile concernant le niveau d'eau en raison d'une sensibilité surface en eau/niveau d'eau très faible (présence de berges à fortes pentes). Les plans d'information contenant les plans d'eau de gravières, les lacs et le lit mineur de la rivière peuvent être générés à partir de photographies aériennes, de données topographiques ou d'images RSO acquises hors de la période de crue.

3.1.4 Construction des segments informatifs

La carte de la zone inondée obtenue par double seuillage (figure 4A), dont les zones d'oublis et les zones inutiles pour une estimation du niveau d'eau ont été masquées (figure 4B), contient des bordures épaisses et discontinues qui seront utilisées pour l'estimation des niveaux d'eau.

Les segments informatifs (figure 4C) sont des éléments de ces bordures, sélectionnés puis décomposés suivant des critères de taille à ne pas dépasser : on veut que les segments informatifs soient représentatifs vis-à-vis de l'incertitude spatiale associée à l'image RSO et qu'une hypothèse de niveau unique dans chacun de ces segments soit acceptable. La dimension minimale d'un segment informatif le long de l'écoulement est choisie égale à la résolution spatiale de l'image, augmentée de la précision de son géopositionnement, soit 30 m + 10 m = 40 m pour l'image RSO. La dimension maximale d'un segment informatif le long de l'écoulement est telle que le niveau d'eau N_e^i peut y être considéré inférieur à la précision attendue pour l'estimation du niveau d'eau, soit 20 cm d'après Raclot (2003). En supposant que la pente locale de la surface libre de l'eau en tout point de la plaine est inférieure ou égale à la pente moyenne de la rivière (p), la variation du niveau d'eau dans l'axe d'un segment informatif de dimension ΔX est inférieure à $\Delta X*p$. La taille maximale, correspondant à une pente de 0,0005, est alors de 400 m.

Les segments informatifs trop petits sont éliminés de l'analyse et les segments informatifs trop longs seront découpés lors de la phase de resserrement de l'estimation des niveaux d'eau.

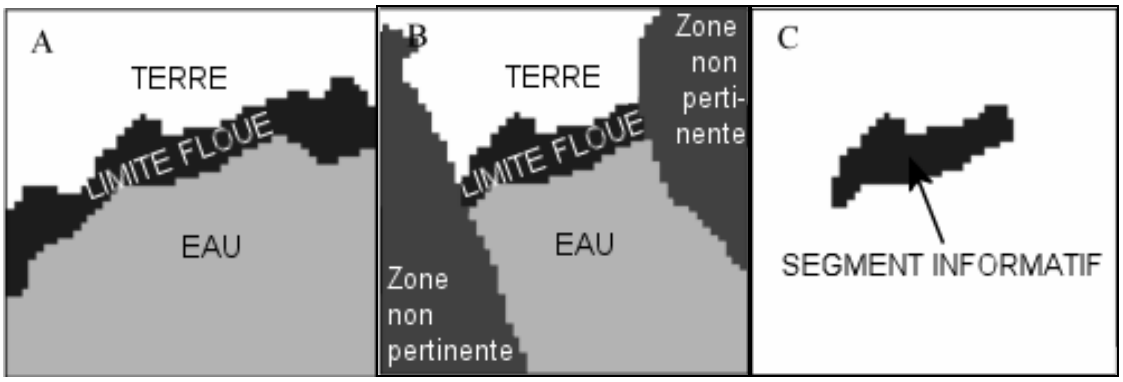


Figure 4 : Carte de la zone inondée avec une limite floue et construction des segments informatifs. A : Carte de la zone inondée avec une limite floue provenant du double seuillage radiométrique ; B : Carte où sont éliminées les zones non pertinentes ; C : Segment informatif résiduel. *Flood extent map with fuzzy boundaries and generation of informative segments. A : Flood extent map with fuzzy limits obtained via "double" thresholding ; B Elimination of irrelevant areas ; C: Residual relevant segment.*

3.2. Estimation primaire des niveaux d'eau

La deuxième étape de la méthode, le croisement entre le MNA et les segments informatifs provenant des données de télédétection, a pour objectif de calculer des niveaux d'eau dans la plaine inondée sous la forme d'intervalles au sein desquels le niveau d'eau réel est inclus.

La limite réelle d'une zone inondée ne peut être localisée de façon parfaite à partir d'une image RSO. C'est pourquoi les segments informatifs ont une épaisseur, qui traduit l'incertitude radiométrique de positionnement de la limite de la zone inondée, liée à la présence de pixels partiellement inondés. L'incertitude sur le positionnement de la limite de la zone inondée est également liée à une incertitude spatiale. En amplitude, la résolution spatiale (RS) des images RSO est différente de la taille du pixel sur l'image. La carte de la zone inondée étant le résultat d'un seuillage à l'échelle du pixel, la position des bordures de cette carte n'est potentiellement connue qu'à une RS près. De plus, pour pouvoir être croisées avec d'autres données (par exemple un MNA), les images RSO doivent être géopositionnées. À la suite du géopositionnement, les coordonnées géographiques des pixels de l'image RSO, et donc des segments informatifs, ne sont connues qu'à la précision du géopositionnement (PG) près. Cette incertitude spatiale doit être prise en compte lors de l'estimation du niveau d'eau. Pour cela, les bordures floues sont dilatées à l'aide d'une zone tampon dont l'épaisseur est V = RS + PG.

Les segments informatifs tenant compte, à la fois, des incertitudes radiométrique et spatiale imposées par les données de télédétection, l'hypothèse suivante peut être faite : les limites réelles de la zone inondée sont supposées traverser l'ensemble des segments informatifs. En conséquence, l'altitude du terrain au sein d'un segment informatif fournit une valeur probable du niveau d'eau, donc N valeurs de niveau d'eau probables, où N est le nombre de pixels du MNA inclus dans le segment informatif.

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

Ces estimations, dites primaires, proviennent d'un croisement entre les segments informatifs et le MNA, sans considération pour les phénomènes mis en jeu dans un écoulement lors d'une 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 l'incertitude.

3.3. Réduction de l'incertitude dans l'estimation des niveaux d'eau

La méthode de mise en cohérence hydraulique proposée par Raclot (2003) repose sur le principe de la décroissance de la charge hydraulique dans le sens des flux, qui est assimilable, en présence de vitesses d'écoulement faibles à une décroissance du niveau d'eau de l'amont vers l'aval. Elle implique la connaissance d'une hiérarchie hydraulique, constituée d'un ensemble de relations d'ordres partiels (amont-aval) entre les segments informatifs SI_i. L'expression « relations d'ordres partiels » est employée ici car chaque combinaison de deux segments informatifs n'est pas nécessairement affectée d'une relation d'ordre amont-aval.

3.3.1 . Construction d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs

L'étape de détermination des relations d'ordres partiels est particulièrement importante, car elle est conditionne le resserrement de l'estimation des niveaux d'eau.

Le sens d'écoulement de l'eau dans une plaine inondée n'est pas observable directement sur les images RSO, contrairement à ce qui est possible de faire à partir des photographies aériennes. En conséquence, pour mener à bien la construction d'une hiérarchie hydraulique des segments informatifs, la méthode exploite des données diverses et complémentaires. Elle fait aussi appel à une phase d'expertise hydraulique guidée par des critères et des principes de construction des relations d'ordres partiels afin de laisser peu de place à la subjectivité de l'opérateur.

Sur la figure 5, on explicite le schéma général de la construction de cette hiérarchie hydraulique, qui s'appuie tant sur les segments informatifs que sur des données exogènes de courbes de niveau, d'infrastructures (routes, voies de chemin de fer, etc.) et d'occupation des terres (urbain, forêt) ainsi que sur la carte de la zone inondée provenant de l'analyse de l'image radar.

La construction passe par quatre étapes. On définit d'abord des unités hydrauliques, puis on identifie le sens d'écoulement de l'eau à l'intérieur de ces unités. On en déduit alors des relations d'ordre amont-aval entre unités hydrauliques. Enfin, 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 une hiérarchie hydraulique de ces segments.

La plaine est découpée en unités hydrauliques (UH) qui sont définies comme des zones dans lesquelles une hypothèse d'écoulement monodimensionnel (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 5C) sont les zones émergées qui isolent l'une de l'autre deux parties de la zone inondée (ZEI) (figure 5A) et les infrastructures qui perturbent l'écoulement hydraulique (digues, talus, voies de communication surélevées, haies d'arbres) (INFH) (figure 5B). Les ZEI peuvent être interprétées sur la carte de la zone inondée, 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).

Pour définir un schéma de circulation des eaux, nous proposons de déterminer des lignes d'écoulement préférentiel au sein des unités hydrauliques, lesquelles 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 niveau (figures 5C et D). La ligne d'écoulement préférentiel est définie en interprétant les courbes de niveau : elle a pour objectif de représenter la direction dominante des flux, c'est à dire la direction générale des perpendiculaires aux courbes de niveau. Le but de cette phase n'est pas une identification parfaite d'une ligne d'écoulement representative, mais plutôt la caractérisation des bordures amont et aval de chaque unité hydraulique, la direction générale du flux et la hiérarchie hydraulique (type amont-aval) des segments informatifs, qui sont à l'intérieur de cette unité.

Cette approche est valable en phase de décrue (cas de l'image RSO utilisée), 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 de la zone inondée et des données topographiques seules ne permettent pas d'identifier.

Pour identifier les liens hydrauliques entre unités, nous allons considérer les informations internes aux unités successives provenant de l'étape précédente (directions des flux internes, bordures amont et aval) ainsi que les informations sur les interfaces entre unités (probabilité d'écoulement et obstacles émergés ou immergés), en se basant sur les ZEI et les INFH. Les ZEI correspondent à des obstacles et empêchent un lien hydraulique entre les unités voisines. Le rôle des INFH dépend de leur état de submersion. Celles qui apparaissent immergées sur la carte de la zone inondée, réalisée à partir de données satellitaires, peuvent être qualifiées de façon certaine d'immergées et permettent un lien hydraulique. Par contre, celles que la carte de la zone inondée ne recouvre pas ne peuvent être qualifiées de façon certaine d'émergées, à la suite de la perturbation possible du signal radar par des éléments, tels 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 du sens et de la direction d'écoulement entre ces deux unités, c'est-à-dire 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 5E).

Chaque segment informatif est situé au sein d'une grande unité hydraulique et peut, par conséquent, être associé à cette unité. Rappelons par ailleurs qu'il peut y avoir plusieurs segments dans une même unité. Grâce à la connaissance du sens d'écoulement interne à cette unité, il est possible d'identifier les relations d'ordre entre les segments informatifs d'une 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 relations d'ordre partiel, puisque tout couple de segments n'est pas affecté d'une relation d'ordre. Sur la figure 5F, on représente symboliquement la hiérarchie obtenue.

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

3.3.2 Algorithme de mise en cohérence hydraulique

L'algorithme de mise en cohérence hydraulique impose une décroissance de la charge hydraulique entre segments successifs, dans le sens amont aval, simplifié en décroissance des niveaux d'eau compte tenu des très faibles vitesses dans la plaine inondée. Il part de l'hypothèse que les estimations des niveaux d'eau extraites de l'image radar sont fiables, pour l'ensemble des segments informatifs, compte tenu de l'incertitude et des hypothèses formulées. Dès lors, seules les valeurs comprises entre les bornes N^i_{max} et N^i_{min} de l'intervalle d'estimation du niveau d'eau sont potentiellement justes. Par conséquent, les valeurs N^i_{max} et N^i_{min} sont respectivement des majorants et minorants du niveau d'eau réel.

Par ailleurs, les niveaux d'eau estimés, qui caractérisent l'écoulement de la crue au moment d'acquisition de l'image RSO, ont été extraits indépendamment les uns des autres. L'algorithme de mise en cohérence hydraulique va permettre de relier les niveaux entre eux. La décroissance des niveaux successifs est transformée en contraintes numériques et l'algorithme (Raclot, 2003) propage ces contraintes entre les niveaux d'eau dans la plaine inondée, en suivant la logique de l'écoulement définie par la hiérarchie hydraulique des segments informatifs. Il est composé de deux phases successives :

1) une phase de vérification et, le cas échéant, d'élimination des conflits, cette dernière devant rester anecdotique pour respecter l'hypothèse précédemment définie,

2) une phase de resserrement de l'incertitude dans l'estimation des niveaux d'eau.

Deux estimations du niveau d'eau sont en conflit si elles ne respectent pas le principe de décroissance du niveau d'eau le long de l'écoulement. Cela correspond, avec les notations définies à la section 3.2, à : SI_i est à l'amont de SI_j et $N^j_{min} > N^i_{max}$. En effet, dans ce cas, aucune des valeurs de niveau d'eau probables pour les segments informatifs SI_i et SI_j ne permet de respecter la décroissance du niveau d'eau de SI_i vers SI_j.

Lors de la phase d'élimination des conflits, l'ensemble des majorants et des minorants des intervalles d'estimation du niveau d'eau affectés d'une relation d'ordre amont-aval sont comparés successivement, en suivant la logique de l'écoulement. Si un conflit est rencontré, les valeurs du majorant et du minorant correspondantes sont remplacées, respectivement, par les bornes maximale et minimale de l'ensemble des valeurs probables du niveau d'eau.

La phase de resserrement des estimations repose sur un algorithme de propagation de contraintes. Raclot (2003) a montré que le fait de propager les contraintes hydrauliques en suivant la logique de l'écoulement permet d'éviter des itérations successives et de résoudre le système de contrainte rapidement. En conséquence, l'algorithme de mise en cohérence hydraulique impose, d'une part, une décroissance des majorants (N^i_{max}) de l'amont vers l'aval et, d'autre part, une croissance des minorants (N^i_{min}) de l'aval vers l'amont (figure 6).

L'application de cet algorithme de réduction de l'incertitude conduit à des nouvelles estimations du niveau d'eau, $N2^i_{min}$ et $N2^i_{max}$, rendues cohérentes hydrauliquement. On en déduit la valeur moyenne $N2^i_{moy} = \left(\frac{N2^i_{max} + N2^i_{min}}{2} \right)$ des deux niveaux calculés, pour chaque segment informatif.

4. RÉSULTATS

4.1. Cartographie de la zone inondée et extraction des bordures pertinentes pour une estimation du niveau d'eau

La résolution spatiale utile de l'image RSO est considérée égale à 30 m. Nous avons estimé qu'aucun filtrage n'était nécessaire sur cette image. À la date d'acquisition de l'image, la vitesse du vent était modérée soit 7 $m.s^{-1}$ (donnée de Météo-France). Par conséquent, nous avons supposé que les effets dus au vent sur l'image ne perturbent pas la détection de l'eau avec la méthode de double seuillage.

Pour les seuillages radiométriques, nous avons retenu les valeurs S_{max} = -12 dB et S_{min} = -15 dB, correspondant respectivement au quantile de 1 % de la distribution Gamma de rétrodiffusion de la prairie et à la moyenne des rétrodiffusions moyennes de l'eau libre et de la prairie. À la suite du double seuillage, nous avons obtenu une carte de la zone inondée avec des limites floues, traduisant l'incertitude liée à la présence de pixels partiellement inondés en bordure de la zone inondée (figure 7A).

Ensuite, conformément à la méthode proposée à la section 3.1.3, après épuration des zones de surdétection dues au chatoiement et au relief, nous avons éliminé de la carte de la zone inondée les zones où la détection de l'eau est perturbée (arbres et bâtiments) et les zones inutiles pour une estimation du niveau d'eau. Cela a permis de masquer les secteurs de la carte de la zone inondée non pertinents pour une estimation du niveau d'eau, puis d'extraire les segments informatifs (figure 7B) correspondant aux parties pertinentes des bordures floues de la carte de la zone inondée.

Suivant les critères de construction présentés à la section 3.1.3, les segments informatifs sont des éléments des bordures pertinentes dont la taille est comprise entre 40 m et 400 m.

4.2. Estimation primaire des niveaux d'eau

L'extraction des altitudes du MNA a été effectuée dans le voisinage de dimension V = 40 m des segments informatifs, à partir de la relation présentée à la section 3.2 : V = RS + PG avec RS = 30 m, PG = 10 m. Cela a permis d'obtenir des estimations ponctuelles du niveau d'eau sous la forme d'intervalles $[N^i_{min}, N^i_{max}]$ (figure 8A). Pour caractériser l'incertitude d'estimation du niveau d'eau, la taille moyenne des demi-intervalles d'estimation $\left(\text{Moyenne}\left(\frac{N^i_{max} - N^i_{min}}{2}\right)_i\right)$ a été calculée sur l'ensemble des segments informatifs. La « demi-incertitude » ainsi obtenue sur l'estimation primaire des niveaux d'eau est estimée à 80 cm. Cette demi-incertitude est à rapprocher de celles obtenues par Brakenridge *et al*. (1998) avec des images RSO d'ERS. Elle paraît trop importante pour des applications en hydraulique fluviale. C'est pourquoi, dans la section suivante, nous proposons une phase de mise en cohérence hydraulique pour réduire l'incertitude dans l'estimation du niveau d'eau.

4.3. Réduction de l'incertitude dans l'estimation des niveaux d'eau

En préalable de l'application de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique, il est nécessaire de construire la hiérarchie hydraulique des segments informatifs. Pour cela, la phase d'expertise proposée à la section 3.3.1 a été réalisée à partir de la carte de la zone inondée extraite de l'image RSO, des courbes de niveau générées à partir du MNA et des données d'occupation des terres concernant les arbres et les bâtiments interprétés sur les photographies aériennes à 1: 25 000. Cela a permis de construire le schéma de circulation des eaux présenté sur la figure 9. Appliqué aux segments informatifs, ce schéma a permis de découper les segments informatifs de sorte que leur dimension le long de l'écoulement soit inférieure à 400 m. En réalité, afin d'obtenir des segments informatifs les plus petits possibles, avec une taille néanmoins représentative vis-à-vis de l'incertitude spatiale de l'image, les segments informatifs ont été découpés pour avoir une taille comprise entre 2*(RS+PG) = 80 m et 4*(RS+PG) = 160 m. Grâce au schéma de circulation des eaux, il a été possible de construire la hiérarchie hydraulique des segments informatifs ainsi découpés.

Pour rappel, les estimations primaires du niveau 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. À la suite de l'application de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique, la demi-incertitude d'estimation des niveaux d'eau est, dans notre cas, de 40 cm (figure 8A). Cette valeur est à rapprocher de la demi-incertitude de 20 cm obtenue par le même type d'approche à partir de photographies aériennes à 1 : 18 000. L'écart obtenu entre les deux types de supports existe, mais il demeure acceptable en regard des informations requises en terme de la modélisation hydraulique.

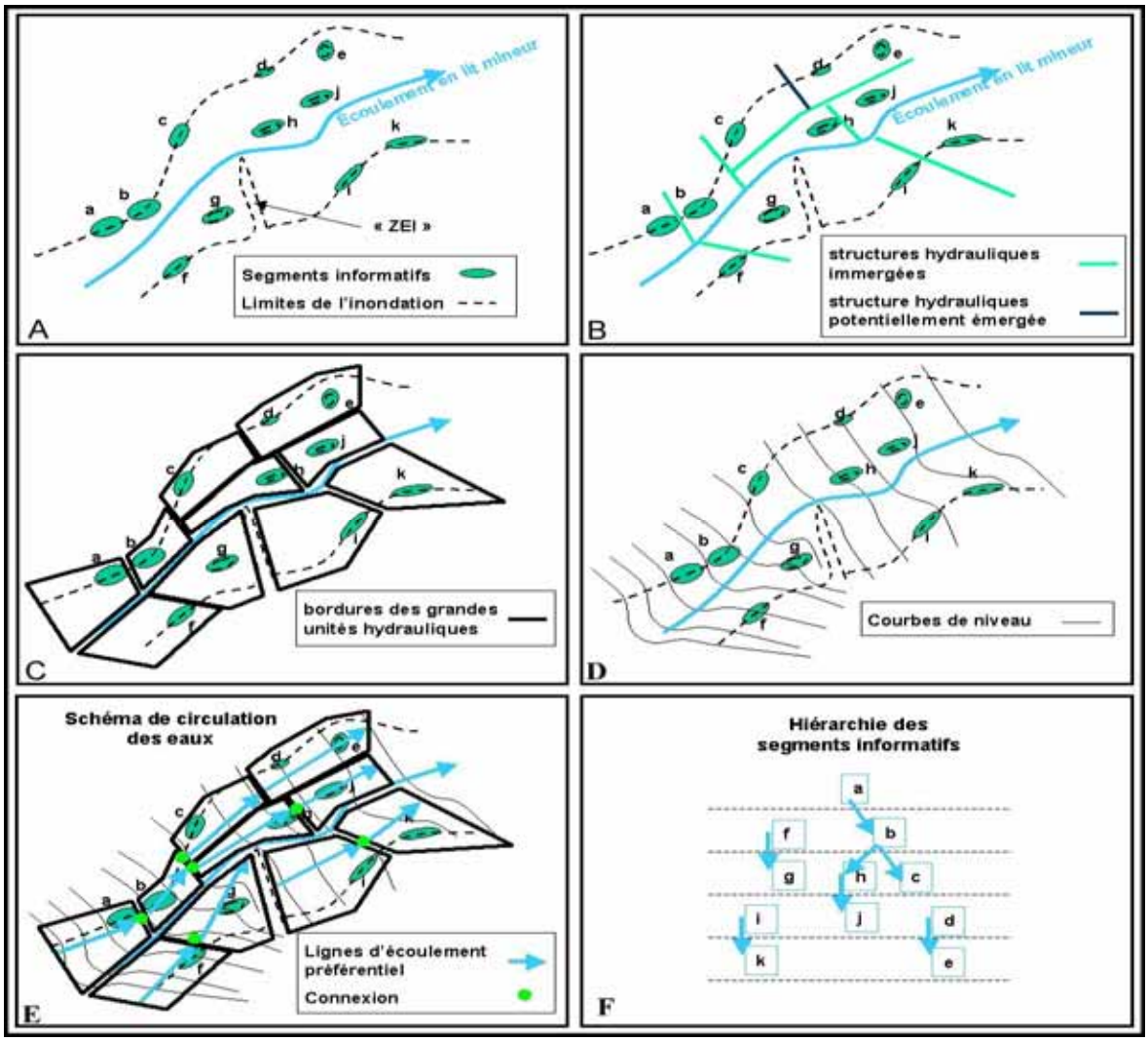


Figure 5 : Étapes de la construction de la hiérarchie hydraulique. *Stages of definition of the hydraulic hierarchy*

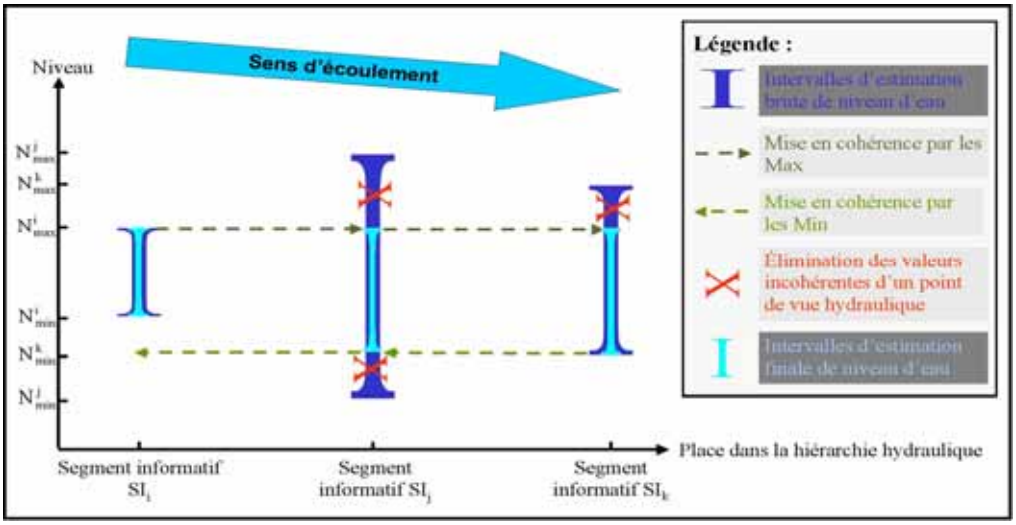


Figure 6 : Propagation des contraintes lors de la mise en cohérence hydraulique. *Constraint propagation during hydraulic coherence algorithm application.*

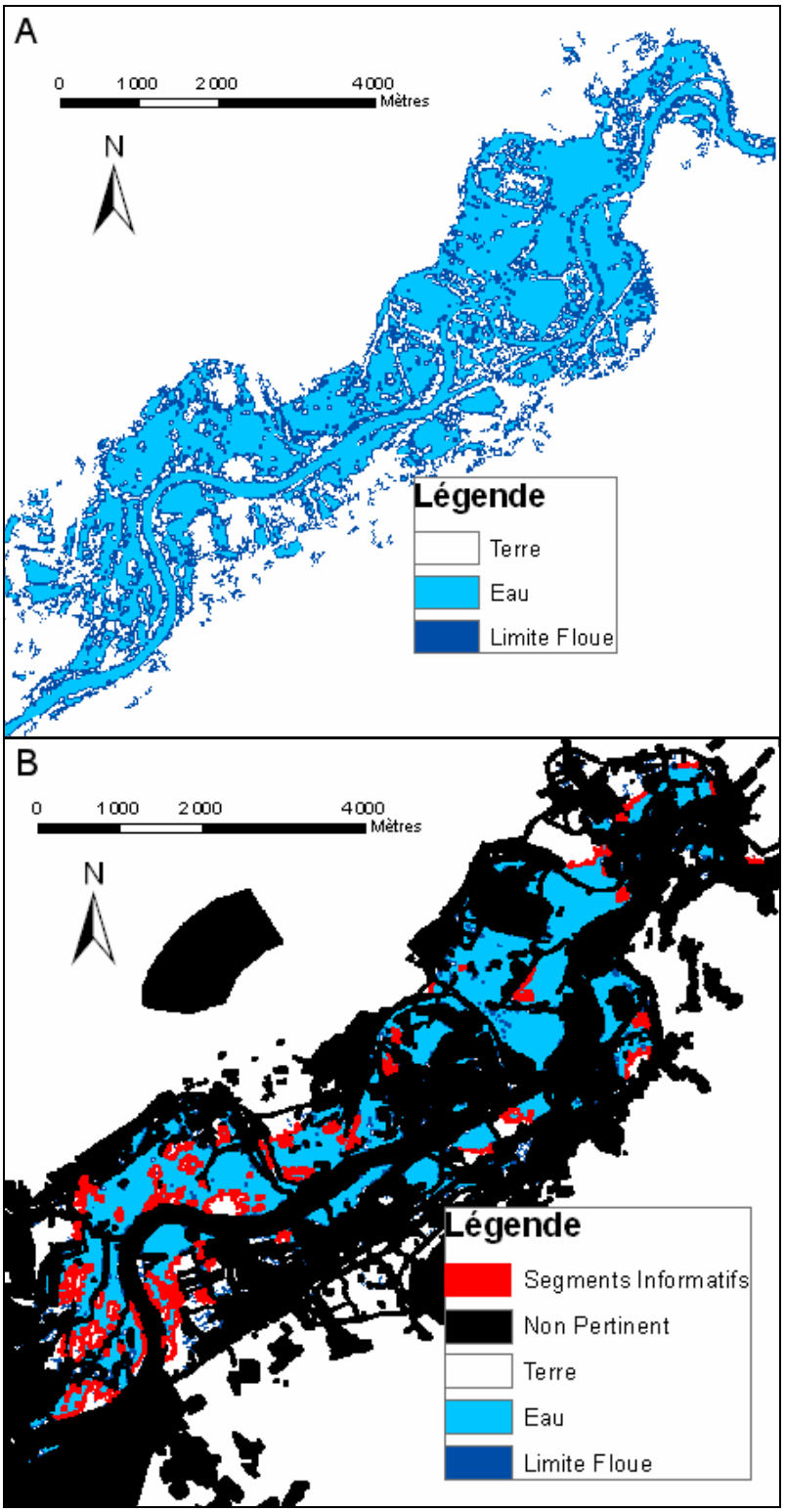
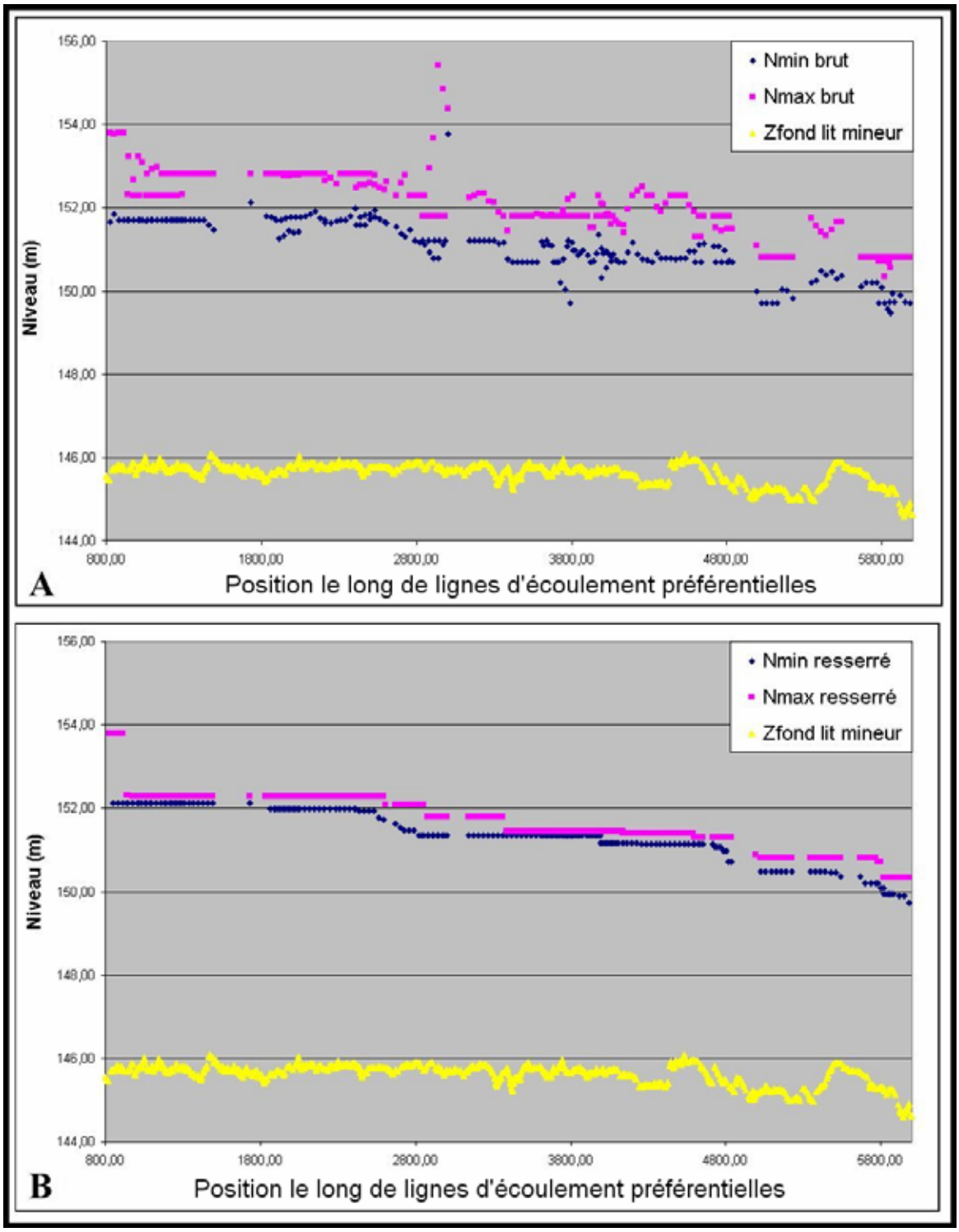


Figure 7 : De la carte de l'étendue inondée (A) aux segments informatifs (B). *From the flood extent map (A) to identifying informative segments (B).*



Figures 8 : Exemple d'estimations primaires (A) et resserrées (B) du niveau d'eau (intervalles [Max, Min]). Les triangles jaunes représentent l'altitude du fond du lit mineur de la Moselle. *Example of primary (A) and constraint (B) water level estimates. Yellow triangles correspond to the channel bottom elevation.*

5. DISCUSSION

5.1. Intérêts et limites de la mise en cohérence hydraulique

La phase de définition de la hiérarchie hydraulique est la seule phase de la méthode faisant intervenir une part d'expertise. Cette expertise, bien qu'indispensable dans la méthode, n'est que peu subjective. En effet, à aucun moment n'est faite une hypothèse univoque d'un schéma d'écoulement à l'échelle de la plaine. Cette phase donne uniquement des directions principales d'écoulement dans la plaine. Par conséquent, cette méthode ne peut être efficace que dans une plaine dont le schéma d'écoulement est relativement simple. En effet, dans le cas d'un schéma d'écoulement très complexe comme c'est le cas dans la plaine aval de l'Hérault (Raclot, 2003), les relations d'ordres qui pourraient être définies par les critères évoqués à la section 3.3.1 seraient en nombre très réduit. La mise en cohérence hydraulique n'aurait en conséquence qu'une efficacité restreinte.

Au contraire, pour site d'étude de la Moselle, la mise en cohérence hydraulique est très efficace, car elle réduit de 50 % l'incertitude dans l'estimation des niveaux d'eau. D'autre part, le nombre très réduit de conflits (un seul conflit sur l'ensemble de la plaine) montre la pertinence de la hiérarchie hydraulique construite dans la plaine.

5.2. Validation de l'estimation des niveaux d'eau sur un site d'étude complémentaire

Aucune réalité de terrain n'a pu être recueillie concernant les niveaux d'eau dans la plaine de la Moselle à l'instant de l'acquisition de l'image RSO. Par contre, en collaboration avec le Centre de recherche publique G. Lippmann au Luxembourg, il a été possible d'appliquer la méthode d'estimation du niveau d'eau à un tronçon de 10 km de la rivière Alzette, situé entre Steinsel et Mersch, dans le Grand-Duché du Luxembourg et à environ 30 km de la zone d'étude. Pour ce site, des mesures des plus hautes eaux sont disponibles. Ces travaux ont été réalisés à partir : 1) d'une image du capteur radar d'ENVISAT (bande C, polarisation HV-VV, taille du pixel de 12,5 m, résolution spatiale de 25 à 30 m), acquise à l'instant du passage du pic de la crue de février 2003 ; 2) d'une image satellitaire d'IKONOS à très haute résolution spatiale (bandes dans le rouge, le vert et le bleu, avec une résolution spatiale de 1 m) prise hors de la période de crue et 3) d'un MNA, construit avec des données d'un LiDAR (taille du pixel de 2 m et précision altimétrique de ±15 cm).

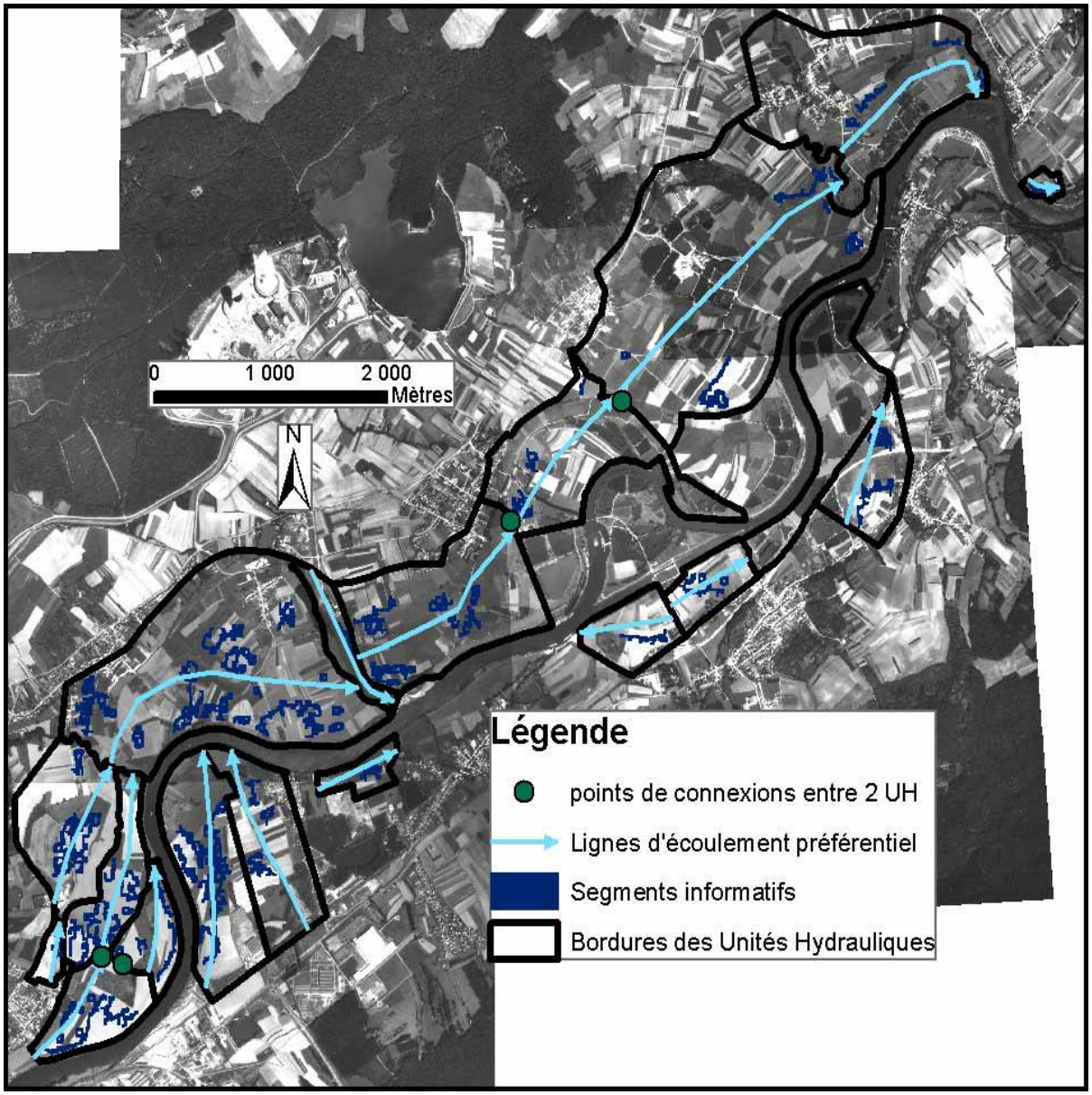
L'extraction d'une carte de la zone inondée (figure 10A) à partir de l'image du capteur radar d'ENVISAT avait fait l'objet de travaux antérieurs (Matgen *et al*., 2004 ; Schumann *et al.,* sous presse*)*. À partir de l'image d'IKONOS, il a été possible de construire un masque représentant les secteurs non pertinents de la carte de la zone inondée pour une estimation du niveau d'eau. Appliqué à la carte de la zone inondée, ce masque à permis de construire les segments informatifs qui, croisés avec le MNA, ont fourni une estimation primaire du niveau d'eau avec une demi-incertitude de 80 cm.

Dans le cas de l'Alzette, le schéma d'écoulement, plus simple que pour la Moselle, a été supposé monodimensionnel. La géométrie d'un modèle hydraulique monodimensionnel (Matgen *et al*., 2004), présenté sur la figure 10B, a été exploité pour construire la hiérarchie hydraulique des segments informatifs. En effet, la géométrie de ce modèle permet de connaître le sens et la direction de l'écoulement en tout point de la plaine : l'écoulement est perpendiculaire à des profils en travers de la rivière et s'effectue de proche en proche depuis le profil en amont vers le profil en aval. Les sens et les directions d'écoulement imposés par la géométrie du modèle ont permis de construire une hiérarchie hydraulique des segments informatifs à partir de leur position respective vis-à-vis des profils en travers du modèle hydraulique.

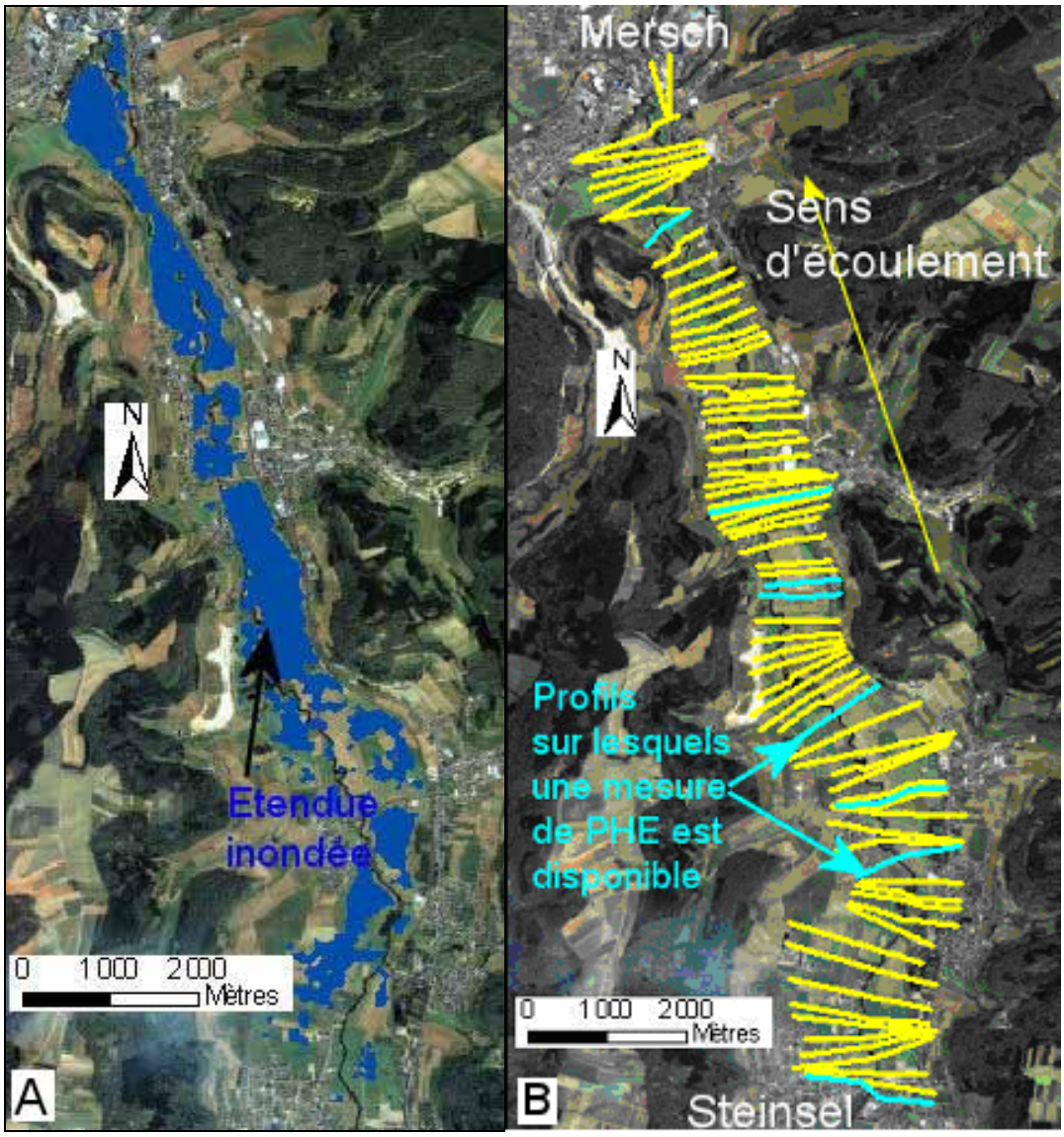
À la suite de l'application de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique, la demi-incertitude sur l'estimation finale est de 40 cm, comme dans le cas de la Moselle.

La comparaison entre la valeur moyenne des estimations finales $N^i_{moy} = \left(\frac{N^i_{max} + N^i_{min}}{2} \right)$ avec les mesures des plus hautes eaux (figure 10B) en sept points répartis dans la plaine a permis de calculer une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 13 cm. De plus, chaque valeur des plus hautes eaux mesurée est incluse au sein de l'intervalle d'estimation du niveau provenant de l'image satellitaire, ce qui valide l'hypothèse suivant laquelle l'estimation du niveau d'eau obtenue au moyen de la méthode inclue le niveau d'eau réel et montre que cette estimation est fiable.

Cette validation est particulièrement importante car la RMSE calculée est un indicateur de la précision de l'estimation du niveau d'eau. Cette valeur semble tout à fait acceptable dans le cadre de la modélisation hydraulique.



Figures 9 : Schéma de circulation des eaux pour la plaine de la Moselle. *Flow propagation scheme for the Mosel river floodplain*



Figures 10 : Données hydrauliques et données de télédétection pour le site de l'Alzette. A étendue inondée extraite de l'image ENVISAT du 2 février 2003, sur fond d'une image satellitaire optique d'IKONOS, et B profils en travers du modèle hydraulique 1D de l'Alzette (Matgen et al., 2004) et mesures de PHE. *Hydraulic and remote sensing data for Alzette study area. A Flood extent estimated from an ENVISAT radar image acquired on February 2, 2003 and superimposed on an IKONOS optical image, and B 1D model cross sections (Matgen et al., 2004) and location of field-based high water marks*

6. CONCLUSION

Par cette étude, on a montré le potentiel important de l'utilisation conjointe d'une image satellitaire radar et d'un MNA fin pour une estimation des niveaux d'eau lors d'une crue. La méthodologie se déroule en trois étapes : une étape de traitement d'image, une étape de croisement de l'image avec un MNA à haute résolution spatiale, puis une étape d'amélioration de l'estimation des niveaux d'eau grâce à un algorithme de mise en cohérence hydraulique. L'application de la méthode a porté sur la crue de la Moselle du 28 février 1997. Des travaux complémentaires de validation ont été réalisés pour la crue de février 2003 de l'Alzette, située près de la Moselle. Il est important de mentionner que l'utilisation d'images RSO n'a permis d'obtenir des résultats satisfaisants que sous la condition de ne considérer que la partie la plus pertinente de l'information concernant la zone inondée. Les caractéristiques spatiales obtenues concernant la crue sont l'estimation de l'extension des eaux et l'estimation de niveaux d'eau ponctuels dans la plaine inondée. La demi-incertitude moyenne (40 cm) dans l'estimation du niveau d'eau a pu être obtenue par croisement entre les informations

pertinentes extraites de l'image RSO et du MNA, puis application d'un algorithme de mise en cohérence hydraulique. Par ailleurs, les travaux de validation sur l'Alzette ont montré que la RMSE calculée sur les valeurs médianes des intervalles d'estimation du niveau d'eau pouvait être décimétrique (13 cm).

La méthodologie présentée dans cet article montre une valorisation certaine des données satellitaires qui dépasse la seule cartographie de l'aléa inondation. Même si l'incertitude dans l'estimation du niveau d'eau est importante par rapport à des mesures au sol, l'imagerie satellitaire a l'avantage de fournir des informations spatialisées 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 une densité et sur une étendue comparables à celles présentées dans cet article paraît impossible.

L'application de la méthode au moyen de données satellitaires montre une précision acceptable en regard des informations requises en terme d'une modélisation hydraulique. Cela implique un potentiel d'utilisation des estimations du niveau d'eau spatialisées pour l'aide au calage et comme condition initiale dans des modèles hydrauliques simples. En particulier, il est envisageable de les utiliser pour calculer rapidement le comportement probable de la crue dans les quelques heures ou quelques jours suivant l'acquisition d'une image satellitaire.

Références

Aronica, G., Hankin, B. and 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, nº 4, p. 349-365.

Brakenridge, G. R., Tracy, B. T. and Knox, J. C. (1998) Orbital SAR remote sensing of a river flood wave. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, nº 7, p. 1439-1445.

Bruniquel, J. and Lopes, A. (1997) Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, nº 3, p. 603-627.

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, ENGREF (École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts), Montpellier, 224p + annexes.

Gumley, L.E. and 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, nº 6, p. 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), p. 611-618.

Henry, J.-B. (2004) Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg I, Strasbourg, 192 p. + annexes.

Horritt, M.S. (2000) Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. Water Resources Research, vol. 36, nº 11, p. 3279-3291.

Lane, S.N., James, T.D., Pritchard, H. and Saunders, M. (2003) Photogrammetric and laser altimetric reconstruction of water levels for extreme flood event analysis. Photogrammetric Record, vol. 18, nº 104, p. 293-307.

Lopes, A., Nezry, E., Touzy, R. and Laur, H. (1993) Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, nº 9, p. 535-544.

Matgen, P., Henry, J.-B., Pappenberger, F., de Fraipon, P., Hoffman, L. and Pfister, L. (2004) Uncertainty in calibrating flood propagation models with flood boundaries derived from Synthetic Aperture RADAR imagery, Proceedings of the 20th Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 12-23 July 2004, Istanbul (Turkey), p. 352-358.

Moore, G.K. and North, G.W. (1974) Flood inundation in the southeastern United States from aircraft and satellite imagery. Water Resources Bulletin, vol. 47, p. 1082-1096.

Nyquist, H. (1928) Certain topics in telegraph transmission theory, Trans. AIEE, vol. 47, p. 617-644, Reprint as classic paper in: Proc. IEEE, Vol. 90, nº 2, Feb 2002, pp. 280-305.

NOAH (2000) New Oportunities of Altimetry in Hydrology. Final report, Cemagref, BFG, Delf Hydraulics, 319 p. + annexes.

Pappenberger, F., Matgen, P., Beven, K., Henry, J.-B., Pfister, L. and de Fraipon, P. (2005a) Influence of uncertainty boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. Advance in Water Ressources, vol. 29, n°10, p. 1430-1449.

Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M. and 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 , nº 1-4, p. 46-69.

Puech, C., Galea, G. et Faure, J.B. (2002) Projet PACTES : Prévention et Anticipation des Crues à l'aide des Techniques Spatiales. Ministère de la

recherche, Synthèse de la contribution du Cemagref, Montpellier, 50 p.

Puech, C. (2000) Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire de recherches présenté en vue de l'obtention d'une Habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Grenoble, 83p.

Raclot, D. (2003) Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II : Sciences et techniques du Languedoc, Unité Mixte de Recherche structure et systèmes spatiaux, Cemagref-ENGREF (École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts), Montpellier, 284 p. + annexes.

Shannon, C. E. (1949) Communication in the presence of noise, Proc. Institute of Radio Engineers, vol. 37, nº 1, p. 10-21. Reprint as classic paper in: Proc. IEEE, Vol. 86, nº 2, (Feb 1998), p. 447-457.

Schumann, G., Hostache, R., Hoffmann, L., Matgen, P., Pappenberger, F., Pfister, L. and Puech, C. (sous presse) High-resolution 3D flood information from radar imagery for effective flood hazard management. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

Smith, L.C., Isacks, B., Bloom, A.L. and 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, nº 7, p. 2021-2034.

Ulaby, F.T. and Dobson, M.C. (1989) Handbook of radar scattering statistics for terrain. Artech House, Nordwood (MA), 357 p.

Ulaby, F.T., Dubois, P.C. and van Zyl, J. (1996) Radar mapping of surface soil moisture. Journal of Hydrology, vol. 184, nº 1-2, p. 57-84.

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, équipe Hydrologie Hydraulique, Lyon (HHLY)-Cemagref, 303 p. + annexes.

Yésou H., Chastanet P., Fellah K., Jeanblanc Y., de Fraipont P., Béquignon J., (2000) Contribution of ERS SAR images and ERS coherence data to a flood system on the Meuse basin - France, P. 597-605, Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium "Looking at our Earth for the New Millennium", Gothenburg, 16-20 October, ESA SP-461.