
Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR

Spatial characterization of flood hazard using SAR images

Renaud Hostache, Christian Puech et Damien Raclot

- ¹ Les satellites RADAR à Synthèse d'Ouverture (RSO) sont très utiles pour la caractérisation spatiale de l'aléa inondation. En effet, ils offrent des observations spatialisées d'inondations avec une haute résolution spatiale. De plus, la qualité des images acquises n'est pas affectée par la nébulosité, ce qui est particulièrement intéressant compte tenu du fait que les crues s'accompagnent la plupart du temps d'un couvert nuageux important.
- ² Certains organismes (e.g. : le SERTIT à Strasbourg) proposent à ce jour des services de cartographie rapide de champs d'inondation à partir d'images satellites (Yesou, Chastanet et al., 2000). Nos objectifs sont de compléter la cartographie de l'aléa en évaluant des niveaux d'eau et d'utiliser ces niveaux d'eau comme base d'une modélisation hydraulique d'inondation. Dans cet article, nous présentons une méthodologie simplifiée pour l'évaluation des niveaux d'eau dans la plaine inondée en trois étapes. Cette méthode est dite simplifiée car l'hypothèse est faite, pour l'estimation des niveaux d'eau que l'écoulement est monodimensionnel, en lien avec une modélisation hydraulique monodimensionnelle.
- ³ L'originalité de la première étape de cette méthodologie est de compléter la cartographie d'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR par l'extraction de la partie la plus informative de cette cartographie.
- ⁴ L'objectif de la deuxième étape est d'évaluer des niveaux d'eau dans la plaine inondée. Pour cela, nous proposons d'utiliser une fusion entre les limites informatives extraites des images satellites RADAR et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à haute résolution spatiale.

- 5 La troisième étape vise à resserrer les estimations de niveau d'eau et les rendre cohérentes d'un point de vue hydraulique. Pour cela, nous proposons l'utilisation d'un algorithme mise en cohérence hydraulique (Raclot, 2003) basé sur la propagation amont - aval de contraintes numériques entre les estimations successives le long de l'écoulement.
- 6 A terme, ces estimations de niveau d'eau peuvent avoir des utilisations multiples, dont la plus attendue est une modélisation hydraulique du devenir de la tache d'eau. Nous nous arrêterons ici à l'étape initiale pour amorcer ce calcul qui consiste à recalculer le dessin de la tache d'eau, par remplissage du MNT à partir des niveaux d'eau estimés. On obtient ainsi une cartographie épurée de l'inondation, la tache MNT¹, base du calcul hydraulique de propagation de l'inondation.

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

Le site d'étude

- 7 L'étude porte sur un tronçon de 15 km de la plaine aval de la Moselle entre Thionville et Berg sur Moselle, près de la frontière franco-germano-luxembourgeoise. A cet endroit, la Moselle a un parcours méandreuex. Sa vallée a une largeur moyenne de 5 km et agit comme une zone de rétention naturelle de grande surface en cas d'écoulement de crues débordantes. Elle draine un bassin versant d'environ 11 000 km² au niveau de la frontière. Une particularité du lit de la Moselle est son niveau d'aménagement important.

Les données de télédétection

- 8 Deux images du satellite RADARSAT 1 (orbite descendante, faisceaux standards S1 et S2) ont été utilisées, l'une hors crue (21 février 1997), l'autre pendant une crue (28 février 1997). Le satellite RADASAT 1 acquiert des images en bande C (longueur d'onde 5.6 cm), en polarisation Horizontale-Horizontale. 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 ont des dimensions verticales supérieures à 2.8 cm. Les deux images RADARSAT 1 ont des résolutions spatiales de l'ordre de 27 m. L'échantillonnage est régulier avec un pixel de 12.5 m de côté. Ces deux images ont été géoréférencées sous Système d'Information Géographique. La RMSE (erreur quadratique moyenne) à l'issue du géoréférencement est inférieure à un pixel. Par ailleurs l'image RADAR du 28 février a été acquise entre 8 et 15 heures après le passage du pic de crue dans la plaine. Ceci implique que l'image RADAR du 28 février a été acquise pendant le début de la période de décrue (vitesse lente de propagation du pic de crue dans la plaine de la Moselle, de l'ordre de 2 km.h⁻¹).
- 9 Cinq photographies aériennes IGN au 1/25000^e, acquise hors période de crue en 1999, couvrant la totalité de la plaine de la Moselle dans la zone d'étude, ont été orthoréctifiées et mosaïquées. La RMSE à l'issue de l'ortho-rectification est inférieure à 10 m. L'orthophotographie ainsi générée nous a permis, par photo-interprétation, de cartographier l'ensemble des zones urbaines et végétalisées dans la plaine d'inondation.

Les données topographiques - création d'un MNT

- 10 Les données topographiques utilisées 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.
- 11 Pour chaque ligne et chaque point sont connus les coordonnées géographiques (X,Y) en projection Lambert 1, et l'altitude Z. 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 60 cm). Les lignes représentent des courbes de niveaux et des « structures topographiques » de la plaine (e.g. : talus, gravières, routes, voies ferrées, etc.). La précision altimétrique moyenne des données brutes est de ± 30 cm.
- 12 A partir des données topographiques brutes, nous avons généré un modèle numérique de terrain en réseau de triangles irréguliers (TIN). Le TIN correspond à une interpolation linéaire entre les points et lignes cotés sur des facettes triangulaires construites suivant les critères de Delaunay. Le TIN a ensuite été converti au format « RASTER » (image) avec une résolution spatiale de 8 mètres pour pouvoir être superposé aux données images. Cette résolution du MNT a par ailleurs été définie conformément au théorème de Shannon – Nyquist, inférieure à la moitié des dimensions spatiales des plus petites structures topographiques représentées par les données brutes ($\sim 15-20$ m). Nous nommons dans la suite MNT les données topographiques interpolées au format RASTER.

Méthodologie

- 13 La méthode que nous présentons dans cet article vise à fournir des informations pertinentes pour la modélisation hydraulique d'inondation, et en particulier à estimer des niveaux d'eau dans une plaine d'inondation. L'idée générale est d'extraire, à chaque étape de la méthode la partie la plus informative des données dans le cadre de l'étude du phénomène inondation. La méthode est structurée en trois étapes successives (Cf. schéma de la méthode figure 1.):
 - cartographie de l'extension des eaux à partir d'images RADAR et extraction des limites informatives
 - estimation primaire de niveaux d'eau par croisement des limites informatives avec un MNT
 - réduction des incertitudes d'évaluation des niveaux d'eau par introduction de concepts de cohérence hydraulique.

Cartographie de l'extension des eaux à partir d'images RADAR et extraction des limites informatives

Pré-traitements des « données RADAR »

- 14 Les images RADAR sont soumises aux effets du chatoiement (« speckle » : bruit inhérent aux systèmes RADAR à synthèse d'ouverture), ce qui les rend difficilement utilisables sans traitements préalables (Henry, Matgen et al., 2003; Henry, 2004).
- 15 Un filtrage temporel, suivi d'un filtrage spatial permet de réduire les effets du chatoiement. Le filtre temporel (Gineste, 1998) est appliqué sur au moins deux images

RADAR ayant des caractéristiques d'acquisition semblables. Les filtres spatiaux couramment utilisés sont adaptatifs, en particulier de type Gamma-cartographique (Lopes, Touzy et al., 1990; Lopes, Nezry et al., 1993). Avec un objectif de cartographie précise de l'extension des eaux, la taille du filtre doit être maintenue la plus petite possible afin de limiter au maximum la dégradation de résolution spatiale. Le filtre Gamma-cartographique a la particularité de conserver les forts gradients radiométriques au sein des images, ce qui est intéressant pour la cartographie de champ d'inondation.

Classification « eau-non eau » sur les images

- 16 Les capteurs satellites RADAR ont une forte sensibilité à la constante diélectrique et à la rugosité de surface. Si on fait l'hypothèse que les surfaces en eau ont une rugosité très faible et une constante diélectrique très grande (Liu, Huang et al., 2002), celles-ci se comportent comme des réflecteurs spéculaires et apparaissent avec des valeurs radiométriques très faibles sur les images.
- 17 Pour identifier l'eau sur l'image filtrée, nous avons choisi une approche basée sur le seuillage radiométrique (Henry, Matgen et al., 2003; Henry, 2004). Pour tenir compte des incertitudes liées à la résolution radiométrique des images et à la variabilité radiométrique des pixels partiellement ou totalement « inondés », il a été choisi de cartographier l'inondation avec une approche en logique floue. Ceci signifie que le seuillage radiométrique est effectué suivant deux valeurs : S_{\min} correspondant à une valeur par défaut, et S_{\max} correspondant à une valeur par excès. La détermination de ces valeurs est basée sur l'analyse de l'histogramme des radiométries de l'image filtrée, la résolution radiométrique des images et les ordres de grandeur des coefficients de rétro-diffusion de l'eau. A l'issue de cette classification, nous obtenons une tache RADAR, dont les limites sont affectées d'une zone d'incertitude (obtenue grâce aux seuils S_{\min} et S_{\max}).

Elimination progressive des zones non pertinentes de la tache RADAR

- 18 La détection par seuillage sur les images RADAR fait apparaître des « sur-détections » et des « oublis ». Ces perturbations sont préjudiciables pour notre problématique car elles rendent non pertinentes les informations issues du RADAR concernant les limites géographiques de l'inondation.
- 19 Les sur-détections se rencontrent essentiellement hors champ d'inondation. Elles proviennent principalement d'effets dus au chatoiement (groupes de pixels isolés supprimés de la tache par seuillage surfacique) et au relief (versants qui ne sont pas atteints par l'onde RADAR incidente, identifiés grâce aux plans des pentes et azimut du terrain naturel sur un modèle numérique de terrain).
- 20 Les « oublis » sont des zones inondées non détectées car elles ont des valeurs radiométriques trop fortes sur les images. Ceci provient d'effets de rugosités locales (e.g. : présence de vent) ou d'éléments qui masquent l'eau (e.g. : végétation ou bâtiments émergés). Les oublis dus aux arbres et bâtiments peuvent être identifiés à l'aide de photographies aériennes (Horrit, Mason et al., 2003).
- 21 D'autre part, le cas des eaux « permanentes » (gravières et lit mineur de la rivière) doit être considéré en particulier. La présence d'eau dans les gravières et le lit mineur de la

Moselle n'est pas nécessairement liée aux débordements et ne peut donner d'information pour l'évaluation des niveaux d'eau. Les plans d'information contenant les gravières 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.

- 22 De plus, compte tenu de l'incertitude spatiale de tracé des contours de la tache RADAR, l'incertitude d'estimation de l'altitude (par fusion entre données images et MNT) sur des zones à forte pente peut s'avérer trop importante. Nous avons par conséquent considéré peu pertinents les pixels de la tache situés sur des zones de la plaine à forte pente.
- 23 La prise en compte des zones perturbées, des eaux permanentes, et des zones à forte pente permet alors de classer les pixels de la tache RADAR en deux catégories :
 - les pixels peu ou pas pertinents : situés en zone perturbée (urbaine ou arborée) ou correspondant aux eaux permanentes ou aux zones à pente forte.
 - les pixels pertinents
- 24 Ceci permet d'extraire les contours pertinents de la tache RADAR. Ne prenant en compte que les pixels classés pertinents, ces contours apparaissent sous une forme discontinue (groupes de pixels contigus isolés les uns des autres).

A partir des contours pertinents, on définit des segments « informatifs » S_i ($i \in [1; d]$). Ces segments informatifs sont constitués de groupes de pixels contigus du contour pertinent sous la double condition que leurs dimensions spatiales soient suffisamment

importantes pour que le nombre m_i de pixels C_i^j du contour qu'ils contiennent soit représentatif, et suffisamment petites pour que le niveau d'eau N_e^i puisse y être considéré sensiblement constant. De plus, ces segments « informatifs » doivent être les plus homogènes possible en terme de morphologie de manière à être cohérents avec l'hypothèse de niveau d'eau constant.

Finalement, cette première étape de la méthode permet, en plus de la cartographie du champ d'inondation, l'extraction de la partie la plus précise et la plus informative des contours de la zone inondée grâce à une expertise et une élimination progressive des différentes perturbations sur les images RADAR, de considérations sur l'occupation du sol et les pentes du terrain naturel. A l'issue de cette étape a été défini un ensemble de segments informatifs $\{S_i, i \in [1; d]\}$, chaque segment contenant un ensemble de pixels contigus $\{C_i^j, j \in [1; m_i]\}$. De plus, grâce à une approche cartographique en logique floue, à chaque segment informatif est affectée une zone d'incertitude liée au choix de la valeur du seuil radiométrique (Cf. : Classification « eau-non eau » sur les images)

Estimation primaire de niveaux d'eau par fusion entre les limites informatives et un MNT

- 25 La deuxième étape de la méthode, la fusion entre le MNT et les données issues des images RADAR, a pour objectif de calculer des niveaux d'eau dans la plaine inondée. Il s'agit d'utiliser les segments informatifs des contours de la « tache RADAR » extraits dans la partie précédente pour estimer des niveaux d'eau à partir d'un MNT.

L'incertitude spatiale associée aux segments informatifs S_i , est due à la résolution spatiale des images RADAR (r_1) et à l'incertitude spatiale liée au choix du seuil radiométrique (r_2). L'incertitude liée au choix du seuil radiométrique est connue localement grâce à la cartographie en logique floue (Cf. §3.1. : Classification « eau-non eau » sur les images). Elle correspond en effet à la dimension de la zone d'incertitude autour des limites de la tache RADAR (obtenue grâce aux seuils S_{\min} et S_{\max}). L'incertitude spatiale (r) de tracé des segments informatifs peut donc être estimée égale à la somme des deux incertitudes : $r = r_1 + r_2$. Pour tenir compte de celle-ci dans l'estimation des niveaux d'eau, on calcule, à partir du MNT, toutes les altitudes dans un voisinage des segments S_i de dimension r . Ensuite, on retient pour chaque segment

informatif les altitudes maximale N_{\max}^i et minimale N_{\min}^i de l'ensemble des altitudes calculées. Ainsi chaque segment informatif (et son voisinage associé) est affecté d'un intervalle de niveaux probables $IN^i = [N_{\min}^i, N_{\max}^i]$, ce qui constitue la première phase de notre extraction.

- 26 A l'issue de cette deuxième étape, nous obtenons une cartographie de segments informatifs pour lesquels sont connus des intervalles d'estimation de niveaux d'eau. Cependant, ces intervalles d'estimation ne tiennent pas compte des phénomènes mis en jeu dans un écoulement et peuvent avoir des tailles trop grandes pour un objectif d'aide à la modélisation hydraulique. C'est pourquoi, nous avons complété cette estimation par la troisième étape.

Réduction des incertitudes d'évaluation des niveaux d'eau par introduction de concepts de cohérence hydraulique

- 27 Dans la troisième étape de la méthode, nous proposons de prendre en considération des concepts de cohérence hydraulique afin de réduire la taille des intervalles d'estimation (i.e. réduire les incertitudes d'estimation sur les niveaux d'eau). La prise en compte de concepts de cohérence hydraulique pour la réduction des incertitudes sur l'estimation de niveau d'eau par fusion entre des données de télédétection un MNT fin a été présentée par D. Raclot pour le cas de photographies aériennes d'inondation (Raclot, 2003).
- 28 Nous proposons de porter ce travail et l'application de contraintes de cohérence hydraulique à une échelle satellitaire. Ces contraintes sont basées sur la cohérence des niveaux d'eau en suivant le sens d'écoulement. En particulier, dans le cadre de cette étude a été utilisé un concept de cohérence amont-aval qui constraint les estimations de niveaux d'eau voisins dans la plaine inondée. La connaissance des directions principales d'écoulement dans la plaine inondée est porteuse d'informations sur la cohérence hydraulique des estimations de niveaux d'eau compte tenu des lois de décroissance des niveaux de l'amont vers l'aval (cas d'écoulement à faible vitesse, le plus souvent rencontré dans les phénomènes de débordement de cours d'eau dans une plaine). La méthode Raclot (Raclot, 2003) est une généralisation de ce concept à l'échelle de la plaine. Elle permet en particulier un resserrement des estimations primaires de niveau d'eau. Ceci implique la connaissance d'une hiérarchie amont-aval des segments informatifs S_i . Dans cet article nous proposons de considérer une hiérarchie hydraulique basée sur un écoulement monodimensionnel (écoulements dans la plaine globalement parallèles à l'axe d'écoulement principal : lit mineur de la rivière). Cette

hypothèse sur le schéma d'écoulement est particulièrement pertinente dans le cas où les estimations de niveau d'eau sont exploitées dans le cadre d'une modélisation hydraulique monodimensionnelle (modèle hydraulique 1D aussi appelé modèle filaire).

En supposant que toutes les valeurs N_{\max}^i et N_{\min}^i sont acceptables compte tenu des incertitudes et des hypothèses formulées, nous procérons en deux phases (Raclot, 2003) :

- une phase de vérification et le cas échéant d'élimination des conflits (définition d'un conflit : un niveau aval est plus haut qu'un niveau amont)
- une phase de resserrement des estimations et d'extraction de l'information commune cohérente.

L'algorithme de resserrement des incertitudes par mise en cohérence hydraulique des estimations de niveaux d'eau revient à imposer une décroissance des estimations maximales (N_{\max}^i) de l'amont vers l'aval et, inversement une croissance des estimations minimales (N_{\min}^i) de l'aval vers l'amont. Nous noterons $IN2^i = [N_{\min}^i, N_{\max}^i]$ les nouveaux intervalles encadrant les niveaux d'eau au sein des S_i à l'issue du calcul.

Avec ces notations, les niveaux d'eau estimés ne présentent pas de conflit s'il existe au moins une solution de l'algorithme satisfaisant la condition : $\forall i \in [1, d], N_{\min}^i \leq N_{\max}^i$

L'application de cet algorithme de réduction des incertitudes conduit aux nouvelles estimations de niveaux d'eau N_{\min}^i et N_{\max}^i rendues cohérentes hydrauliquement. On en déduit la valeur moyenne N_{moy}^i des deux niveaux calculés (Moyenne (N_{\min}^i, N_{\max}^i)) pour chaque segment informatif.

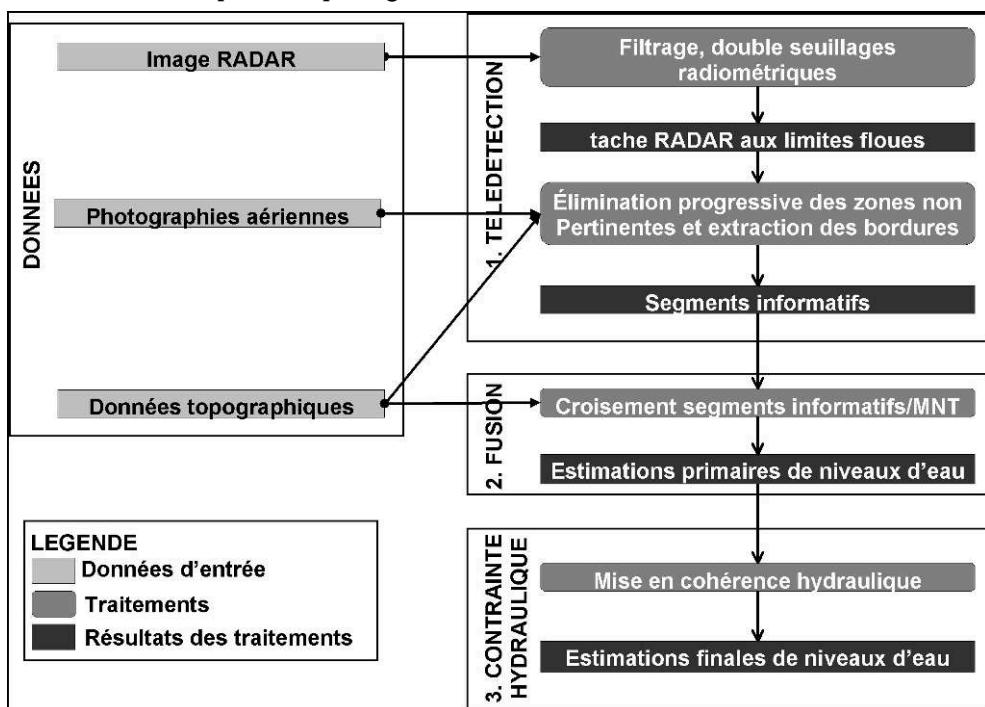


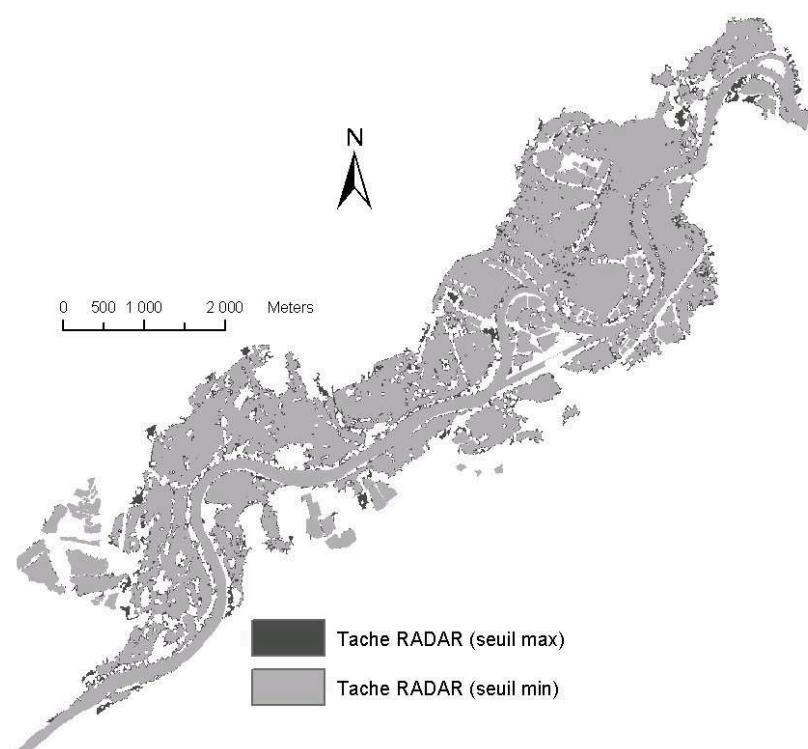
Figure 1 : Schéma de la méthodologie présentée. Les rectangles à fond gris correspondent aux traitements. Les rectangles à fond blanc correspondent aux résultats intermédiaires.

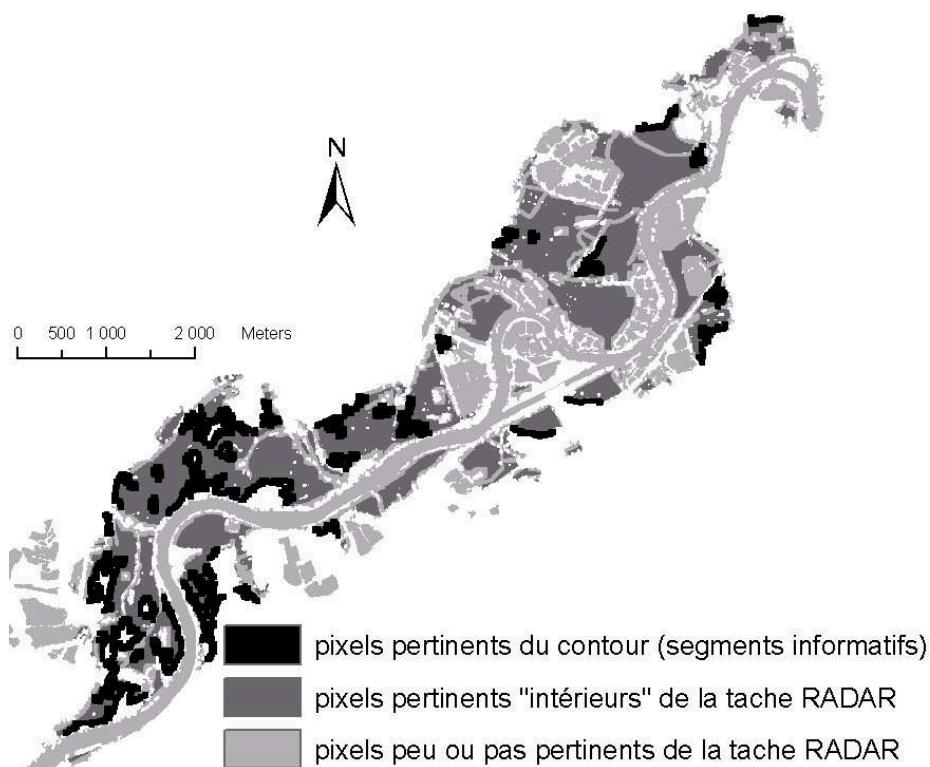
Application de la méthodologie sur le site d'étude

Cartographie de l'extension des eaux à partir d'images RADAR et extraction des limites informatives

29 A l'issue des prétraitements sur les images RADAR (filtrage temporel sur les deux images RADARSAT suivi d'un filtrage spatial de type Gamma-cartographique sur une fenêtre de 3×3 pixels), la résolution spatiale a pu être estimée de l'ordre de 30 m pour une résolution radiométrique de 1.8 dB. Pour le seuillage radiométrique, nous avons retenu les valeurs : $S_{\max} = -12$ dB et $S_{\min} = -15$ dB (figure 2.A.). Nous avons supposé l'absence d'effets dus au vent sur l'image RADAR du 28 février. La mise en confrontation de la tache RADAR avec les informations collectées dans les journaux concernant les routes coupées lors de la crue a permis une validation partielle de la cartographie. Cette validation, bien que partielle montre une cohérence entre des informations extraites des images RADAR et des données « terrain ».

La classification de la tache RADAR en pixels pertinents – non pertinents est présentée dans la figure 2B. Suivant les critères de construction présentés au § 3.2., nous avons sélectionné, pour le site d'étude, $d = 58$ segments informatifs $\{S_i | i \in [1; d]\}$ (pixels noirs sur la figure 2B.). Ainsi, seule une partie des contours de la tache initiale (Figure 2.A.) est utilisée pour le calcul des niveaux d'eau.





Figures 2.A. et 2.B :

A : à gauche représentation de la tache RADAR aux limites floues.

B : représentation de la classification « pertinents-non pertinents » des pixels de la tache RADAR et des segments informatifs utilisés pour le calcul des niveaux d'eau. Pour plus de clarté, le tracé des segments informatifs a été volontairement épaisse.

Estimation primaire de niveaux d'eau par fusion entre les limites informatives et un MNT

- 30 L'extraction des altitudes du modèle numérique de terrain dans les voisinages (r) des segments informatifs ($r_1 = 30\text{m}$ et r_2 connue grâce à la cartographie en logique floue) à permis d'obtenir des estimations ponctuelles de niveaux d'eau selon des intervalles Min, Max. La valeur moyenne de la demi-incertitude (moyenne des $(\text{Max}-\text{Min})/2$) est estimée à 0.9 m (Cf. estimations de niveaux d'eau figure 3.).

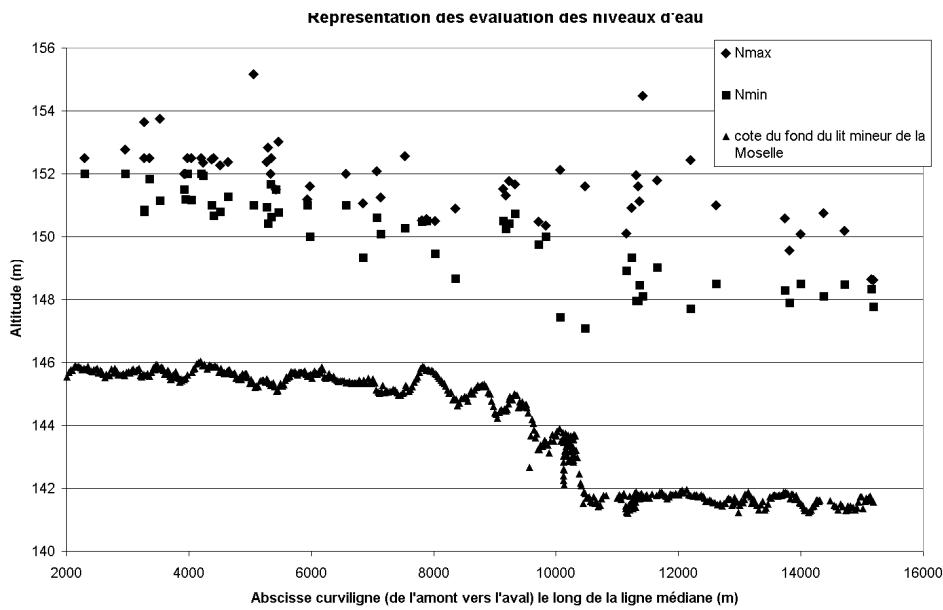


Figure 3 : Résultat de l'étape 2 : estimation primaire des niveaux d'eau (intervalles Max, Min) pour chaque segment informatif. La ligne inférieure représente la cote fond du lit mineur de la Moselle.

Réduction des incertitudes d'évaluation des niveaux d'eau par introduction de concepts de cohérence hydraulique

31 Pour définir une hiérarchie amont-aval, les segments informatifs S_i sont repérés par leur abscisse curvilinear le long de la ligne d'écoulement principal (ligne médiane du lit mineur). A l'issue 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 30 cm (cf. estimations resserrées figure 4.). Cette valeur est à rapprocher des demi-incertitudes de 20 cm obtenues par le même type d'approche (Raclot, 2003) à partir de photographies aériennes au 1/18000. L'écart obtenu entre les deux types de supports est net mais acceptable en regard des informations requises en terme de modélisation hydraulique.

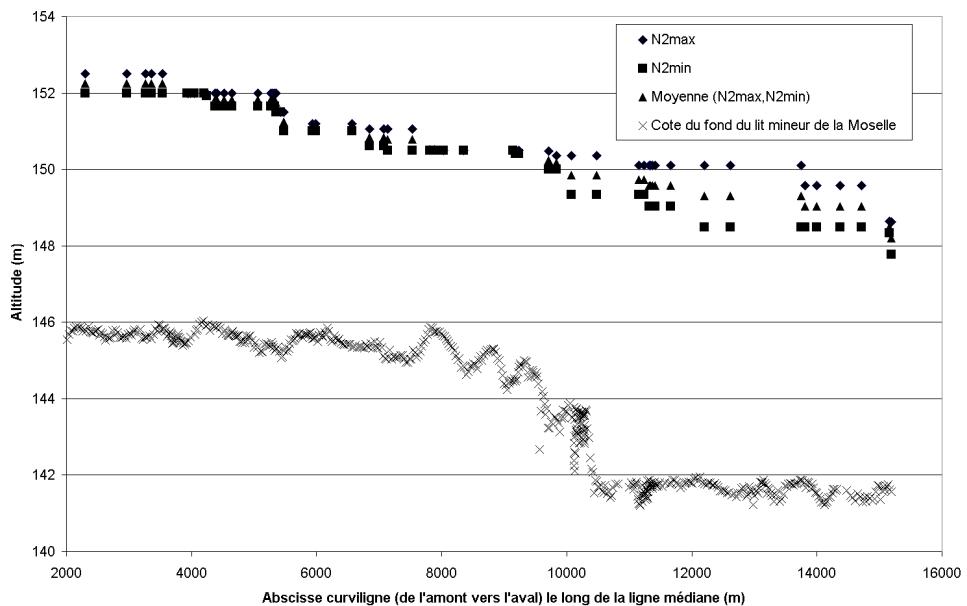
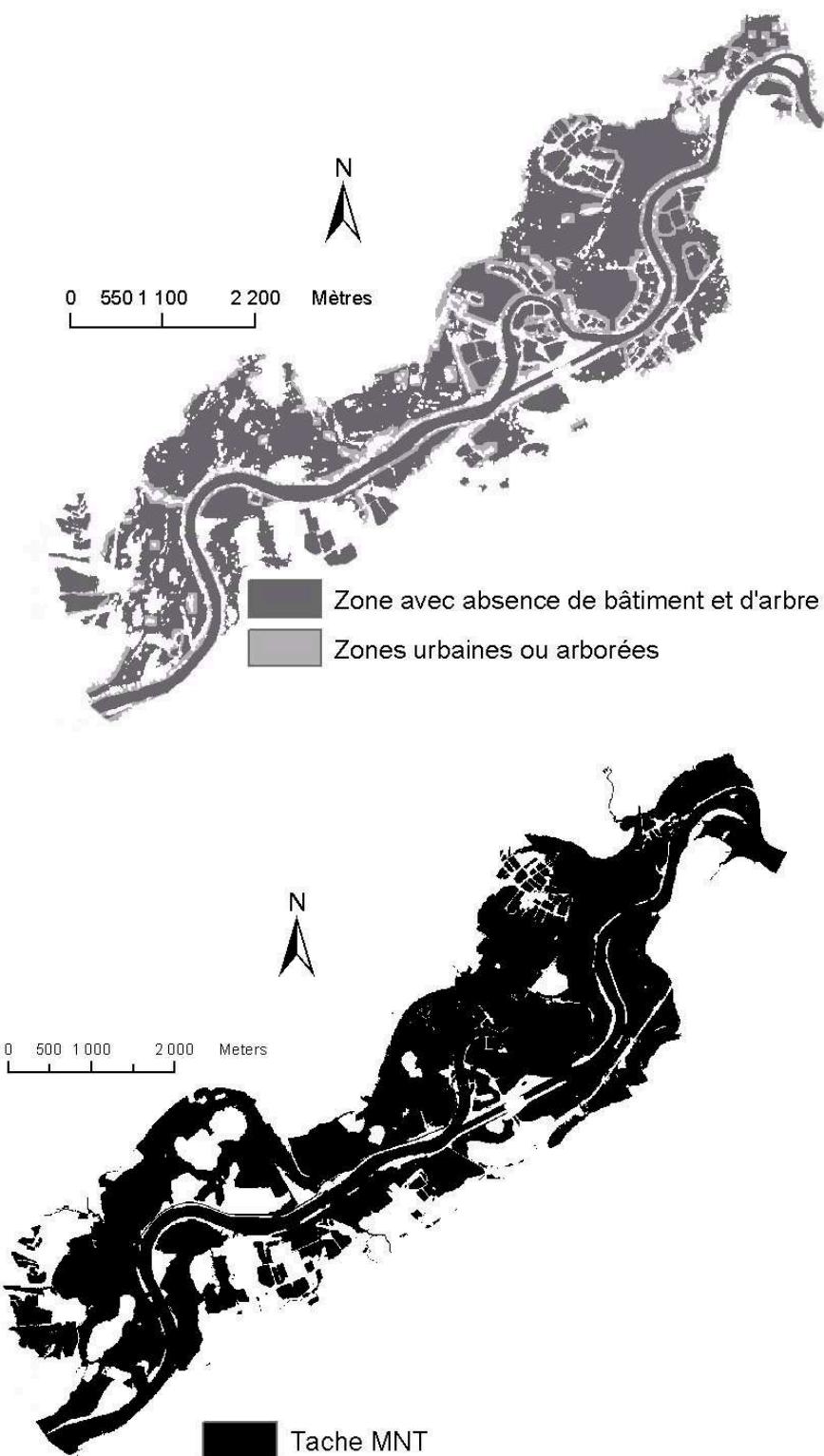


Figure 4 : Résultat de l'étape 3 : estimation des niveaux d'eau (intervalles Max, Min) pour chaque segment informatif après resserrement par l'algorithme de mise en cohérence hydraulique. La ligne inférieure représente la cote fond du lit mineur.

Spatialisation des estimations ponctuelles de niveaux d'eau - création d'une « tache MNT »

Pour définir la condition d'état initial de la plaine dans la modélisation hydraulique, il est nécessaire de connaître des valeurs de niveaux d'eau en tout point. Pour cela, nous généralisons les estimations de l'étape 3 par remplissage du MNT suivant un schéma d'écoulement hydraulique. Nous avons construit une « structure d'écoulement hydraulique » constitué des perpendiculaires $T_i (i \in [1; d])$ à la ligne médiane de la tache RADAR passant par les centres de gravité des segments informatifs $S_i (i \in [1; d])$. Sur chacun de ces transects $T_i (i \in [1; d])$, d'après l'hypothèse d'écoulement 1D, le niveau d'eau est supposé constant, égal aux estimations du paragraphe précédent. En particulier, pour le calcul de la « tache MNT », sont utilisés les niveaux d'eau moyens ($N2_{moy}$). Ensuite, pour estimer le niveau d'eau dans toute la plaine, nous avons interpolé linéairement les estimations entre les transects. Le résultat de la tache MNT obtenue par interpolation des niveaux d'eau et remplissage du MNT est présenté dans la figure 5.B. En comparaison avec la tache RADAR initiale, la tache MNT montre une capacité au remplissage « des trous », des zones urbaines et arborées, et à l'élimination de certaines incertitudes. Normalement, sur cette tache MNT, toutes les limites sont cohérentes par rapport à l'inondation.



Figures 5.A. et 5.B. :

A : à gauche représentation de la tache RADAR avec classification des pixels selon la présence/absence d'arbres et de bâtiments.

B : à droite représentation de la tache MNT obtenue par remplissage du MNT aux niveaux d'eau calculés par interpolation linéaire des estimations ponctuelles moyennes.

Conclusion

- 32 En conclusion, cette étude, basée sur une phase de traitement d'image RADAR d'inondation et de photographies aériennes hors crue et une phase de fusion avec un MNT à haute résolution spatiale, a permis une caractérisation spatiale de la crue du 28 février 1997 sur la Moselle. Les caractéristiques spatiales obtenues sont l'estimation de l'extension des eaux avec un zonage suivant la pertinence de l'information RADAR et l'estimation de niveaux d'eau ponctuels dans la plaine inondée. La demi-incertitude moyenne (30 cm) des estimations de niveaux d'eau a pu être obtenue par fusion entre les données RADAR et le MNT, puis application d'un algorithme de mise en cohérence hydraulique amont-aval.
- 33 La méthodologie présentée a l'avantage de valoriser les données satellites de plus en plus nombreuse au-delà de la cartographie d'aléa. D'autre part, les données satellitaires à haute résolution spatiale, en particulier RADAR, ont l'avantage, à l'instar des données aériennes, de fournir des images avec des emprises spatiales au sol importantes avec une continuité sur de longs linéaires de cours d'eau.
- 34 Le désir de porter la méthode (Raclot, 2003) à une échelle satellitaire montre une précision acceptable, en regard des informations requises en terme de modélisation hydraulique. En particulier, nous envisageons l'utilisation des évaluations de niveaux d'eau spatialisées comme condition initiale pour le routage de modèles hydrauliques simplifiés (Roux, Raclot et al., 2003) permettant de calculer rapidement le devenir probable de la crue dans les quelques heures ou quelques jours suivant l'acquisition d'une image par un satellite.

BIBLIOGRAPHIE

- Gineste, P. (1998), Contribution de l'imagerie satellitaire 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, Sciences de l'eau, ENGREF*.
- Henry, J.-B. (2004), Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, *Thèse de doctorat, Géographie physique, Université de Strasbourg I*.
- Henry, J.-B., P. Matgen, N. Tholey, L. Pfister, L. Hooffman et P. De Fraipont (2003), Vers une intégration des techniques spatiales pour la gestion des inondations.
- Horrit, M. S., D. C. Mason, D. M. Cobby, I. J. Davenport et P. D. Bates (2003), Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 271-281.
- Liu, Z., F. Huang, L. Li et E. Wan (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., E. Nezry, R. Touzy et H. Laur (1993), Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images, *International Journal Of Remote Sensing*, Vol. 14 (9), pp. 535 - 544.

Lopes, A., R. Touzy et E. Nezry (1990), *Adaptative speckle filters and scene heterogeneity, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 28 (6), pp. 992 - 1000.

Raclot, D. (2003), Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de la plaine, *Thèse de doctorat*, Ecole doctorale sciences de l'eau dans l'environnement continental, Montpellier II : Sciences et techniques du Languedoc, 284 p. + annexes.

Roux, H., D. Raclot et D. Dartus (2003), Méthodes d'assimilation de données d'observation de la Terre appliquées à la reconstitution de paramètres hydrauliques, *SFPT*.

Yesou, H., P. Chastanet, K. Fellah, Y. Jeanblanc, P. De Fraipont et J. Bequignon (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.

NOTES

1. Pour plus de clarté, nous nommons dans la suite « tache RADAR » l'extension de l'inondation calculée à partir des images RADAR, et « tache MNT » l'extension de l'inondation générée à partir du MNT.

RÉSUMÉS

Dans le cadre de la gestion du risque d'inondation, la caractérisation spatiale de l'aléa est une problématique récurrente pour laquelle les techniques de télédétection, en particulier satellites, peuvent s'avérer très utiles. L'objectif général de notre étude est d'évaluer les apports de l'utilisation de ces données et, en particulier, de développer des méthodes de valorisation des images satellites RADAR d'inondations pour la caractérisation spatiale de l'aléa. A terme, notre étude vise l'aide à la modélisation hydraulique par évaluation de hauteurs et de volumes d'eau. La méthode que nous proposons s'articule en trois étapes principales : 1) cartographie de l'extension des eaux à partir d'images RADAR et extraction des limites informatives, 2) estimation primaire de niveaux d'eau par croisement entre les limites informatives et un MNT, 3) réduction des incertitudes d'estimation des niveaux d'eau par introduction de concepts de cohérence hydraulique.

Spatial characterization is a recurrent problem in flood risk management for which remote sensing data, especially satellite data can be very useful. The general aim of our study is to evaluate contributions of satellite data use and, especially, to develop methods which upgrade RADAR images for spatial characterization of flood hazard. Our study aims to help hydraulic modelling by evaluation of water heights and volumes. The method presented in this paper is composed of three main stages: 1) flood cartography from RADAR images and extraction of informative limits, 2) water levels evaluation in flood plain by matching informative limits with topographic data, 3) decrease of water levels estimation by introduction of hydraulic coherence concept.

INDEX

Mots-clés : aléa inondation, caractérisation spatiale, télédétection RADAR, modèle numérique de terrain, fusion de données, cohérence hydraulique, Moselle

Keywords : flood, spatial characterization/characterisation, radar remote sensing, digital elevation model, data matching, hydraulic coherence, Moselle

geography 908, 926, 250

AUTEURS

RENAUD HOSTACHE

UM TETIS CEMAGREF Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon - 500, rue J.F. Breton
34093 Montpellier Cedex 5, France
renaud.hostache@teledetection.fr

CHRISTIAN PUECH

CIRAD-ENGREF Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon - 500, rue J.F. Breton 34093
Montpellier Cedex 5, France
puech@teledetection.fr

DAMIEN RACLOT

UMR LISAH ENSAM-INRA Campus AGRO - Bat.24 - 2, place Pierre VIALA 34060 Montpellier,
France
raclot@ensam.inra.fr