TÉLÉDÉTECTION ET GESTION DES CATASTROPHES NATURELLES : APPLICATIONS À L'ÉTUDE DES INONDATIONS URBAINES DE SAINT LOUIS ET DU RAVINEMENT LIÉ À L'ÉROSION HYDRIQUE À NIORO-DU-RIP (SÉNÉGAL)

Souléye WADE[1], Jean Paul RUDANT[2], Kader BA[1], Birama NDOYE[1]

[1]Laboratoire de Télédétection Appliquée, Institut des Sciences de la Terre, Université Cheikh Anta Diop de Dakar BP 5396 Dakar-Fann, Sénégal. Tél. : +221 77 825 25 30, Télécopie : +221 77 824 63 18, Courriel : wadesouleye@yahoo.fr

[2]Equipe Observation de la Terre et Information Géographique, Institut Francilien des Sciences Appliquées, Laboratoire Géomatériaux et Géologie de l'Ingénieur, 5 Bd Descartes , Champs sur Marne, 77454 Marne la Vallée Courriel : rudant@univ-mlv.fr

Soumis le 12 février 2008, accepté le 17 novembre 2008 ; © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 3, p. 203-210

Résumé

Cette publication présente deux applications de la Télédétection et des SIG dans la gestion des catastrophes naturelles, à travers les exemples des inondations urbaines de Saint Louis d'une part et, d'autre part, l'érosion hydrique et le ravinement associé dans la ville de Nioro du Rip (Sénégal). L'intérêt cartographique des données optiques et radar a été démontré dans le contexte des inondations à Saint Louis. Les cartes résultantes ont permis de bâtir un SIG-inondation qui peut servir d'outil d'aide à la décision pour les autorités. Le deuxième exemple concerne l'érosion hydrique qui est responsable du ravinement, de la perte de terres agricoles et de l'effondrement d'édifices publics et de maisons d'habitations à Nioro-du Rip. L'évaluation de l'érosion hydrique est basée sur une analyse quantitative des facteurs de l'USLE. Le MNT, combiné aux données d'érosivité des pluies et d'érodabilité des sols, est exploité pour générer des cartes de sensibilité à l'érosion. Enfin, les cartes d'occupation du sol, dérivées de l'imagerie SPOT-4 HRV, peuvent être intégrées aux cartes de sensibilité à l'érosion pour délimiter les zones à risque.

***Mots clés** : télédétection, SIG, catastrophes naturelles, érosion hydrique, ravinement*

REMOTE SENSING AND NATURAL RISKS : APPLICATIONS TO THE STUDY OF URBAN FLOODS AT SAINT-LOUIS AND OF HYDRIC EROSION GULLIES AT NIORO-DU-RIP (SENEGAL)

Abstract

This paper summarizes two remote sensing and GIS applications in natural disaster management, through urban floods in Saint Louis and water erosion and related gullying in the town of Nioro du Rip (Senegal).Mapping potential of optical and radar data has been assessed in the context of flood disaster in Saint Louis. Significant results have been achieved that have helped build a flood-dedicated GIS, as a decision support tool for authorities. Other water-related disaster of concern is water erosion which is responsible of soil gullying, losses of lands for agriculture and collapse of infrastructures and houses. Water erosion assessment in Nioro du Rip is based on a qualitative analysis of the USLE factors (Universal Soil Loss Equation factors). DEM-derived topographic data combined with rainfall erosivity and soil erodability was used to derive sensitivity water erosion maps. Finally, landcover maps derived from SPOT-4 HRV imagery can be integrated to sensitivity erosion maps in order to delineate erosion risk areas.

***Key words**: remote sensing, GIS, natural disaster, flood, water erosion, gullying*

1 INTRODUCTION

La Télédétection et les SIG sont des outils particulièrement performants pour l'étude des risques de catastrophes naturelles à l'échelle d'un vaste site ou d'une région (Meyer *et al*., 2001). Les applications utilisant les données satellitaires optiques et radar sont multiples (Rango et Salomonson, 1974 ; Blasco *et al*., 1992 ; Yésou et Chastenet, 2000 ; Bach et al., 1999 ; Ortolani et Francesco, 2000 ; Schneider, 2000) : elles vont du suivi des glissements de terrain à l'analyse des inondations, en passant par la gestion des effets des séismes, des éruptions volcaniques, des tempêtes et cyclones tropicaux, des tsunamis, des marées noires, etc. Les données d'observation de la Terre constituent un puissant outil de surveillance des phénomènes d'inondation (Puech, 1995) car elles permettent d'identifier les zones affectées, mais aussi peuvent aider à la mise en place de plans de prévention des risques (Marinelli *et al*., 1997 ; Sandholt et Bjarne, 2000 ; Yesou *et al*., 2001 ; Puech et Raclot, 2002 ; Flouzat *et al*., 2003). Les inondations urbaines et le ravinement lié à l'érosion hydrique des sols sont les catastrophes naturelles qui préoccupent le plus les autorités et les populations sénégalaises. La gestion optimale de telles catastrophes passe d'abord et avant tout par une bonne connaissance des causes des phénomènes et une bonne cartographie de leur extension. La Télédétection spatiale et les SIG jouent un rôle de premier plan dans cette quête de connaissance. Les recherches dont les résultats sont présentés dans cet article ont été réalisées d'une part dans le cadre des projets AUF et CORUS sur les inondations de Saint Louis (Wade et al., 2004a et 2004b ; Chaumon, 2005 ; Onana et al., 2005 ; Béguec, 2006 ; Dia et al., 2006a et 2006b ; Kouamé, 2006) et, d'autre part, dans le cadre du projet TREES (Télédétection des Ressources en Eau et de l'Environnement au Sénégal) de l'initiative TIGER de l'Agence Spatiale Européenne (Bâ et al., 2007 ; Wade et al., 2007a et 2007).

2 LES INONDATIONS URBAINES DE SAINT LOUIS

2.1 Contexte et problématique

La ville de Saint Louis est localisée dans l'estuaire du fleuve Sénégal, en bordure de l'océan Atlantique, à 250 km au Nord de Dakar. Elle s'étend sur un territoire comprenant trois îles : la langue de Barbarie, l'île de Saint louis et le faubourg de Sor (fig. 1).



Figure 1 : Le site d'étude de Saint-Louis montrant le cordon dunaire dit « Langue de Barbarie », coincé entre le fleuve Sénégal et l'Océan Atlantique

La topographie de la ville est très plate et de très faible altitude au-dessus du niveau moyen de l'océan. Ce contexte l'expose à de nombreux problèmes environnementaux, les plus préoccupants étant l'érosion côtière et les inondations

récurrentes qui résultent de l'action combinée de plusieurs facteurs dont les fortes pluies qui augmentent les crues du fleuve, l'écoulement difficile des eaux continentales à cause du cordon littoral dit « Langue de Barbarie », la stagnation des eaux pluviales en ville à cause des faibles pentes et de la nature argileuse des sols, la remontée des eaux du fleuve par les eaux marines lors de fortes marées. D'autres facteurs aggravent les inondations, notamment l'effet bouchon amplifié par l'ensablement du lit du fleuve et l'allongement de la Langue de Barbarie, le non dragage du fleuve, l'urbanisation spontanée et inconsciente en zones inondables, l'absence d'un réseau de drainage approprié et, enfin, la construction sur le fleuve en 1986 des barrages de Manantali – au Mali, dans la partie amont du bassin-versant – et de Diama – à 26 km en amont de Saint Louis. C'est donc l'action combinée de plusieurs facteurs qui provoque les inondations (Dia *et al*., 2006 ; Bâ *et al*., 2007) parmi lesquelles les plus dévastatrices ont été celles de 1994 et de 1999.

2.2 Potentiel cartographique de l'imagerie optique

2.2.1 Base de données

La disponibilité depuis 1972 des données Landsat, le plus ancien programme d'observation de la Terre, en fait une source documentaire exceptionnelle. En effet, les données Landsat assurent une couverture globale de la Terre depuis 1972 grâce aux capteurs MSS (*Multi Spectral Scanner*, 1972-1992), TM (*Thematic Mapper*, depuis 1982 et toujours opérationnel en 2006 avec Landsat 5), et ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*, depuis 1999 et opérationnel en 2000 grâce à Landsat 7). L'analyse de quelques 70 images d'archive Landsat permet de confirmer l'existence du phénomène quasi-annuel de crue en aval du fleuve Sénégal et d'extraire des informations essentielles concernant l'extension cartographique des crues (Dia *et al*., 2006a et 2006b). L'imagerie Landsat donne également la possibilité de suivre l'évolution de l'embouchure du fleuve Sénégal, au sud de Saint-Louis, évolution liée à la progression vers le sud de la Langue de Barbarie (Dia et al., 2006b). Enfin, les données Landsat permettent de suivre l'évolution globale de l'occupation des sols, notamment la progression des dunes sableuses, l'état de la végétation naturelle et la dynamique urbaine (Dia et al., 2006b). La base de données satellitaires exploitée comprend aussi une scène SPOT-4 multispectrale, acquise le 23 octobre 1999, au maximum de la crue (tabl. I). Deux scènes SPOT-4 et SPOT-5 prises respectivement le 31 octobre 2001 et le 17 octobre 2002, en période hors inondation, ont servi de référence. En complément aux données SPOT, nos recherches ont nécessité l'acquisition de données exogènes comprenant une photographie aérienne prise en 1997 et une carte topographique à 1/50 000 réalisée en 1989.

2.2.2 Objectif et méthodologie

L''objectif ultime de nos recherches est de bâtir un SIG sur les inondations de Saint Louis, dans le but d'aider à l'alerte précoce. Le SIG doit informer sur l'ampleur des inondations, leurs causes, mais aussi sur les zones urbaines qui sont menacées par le risque d'inondation. La combinaison des couches d'information du SIG donne des indications sur le degré de vulnérabilité d'une zone urbaine donnée. Parmi les couches du SIG figurent aussi les cartes d'occupation et d'utilisation des sols, les cartes des zones urbanisées et des zones inondées, les modèles numériques de terrain, les données hydrologiques, socio-économiques, etc. (Béguec, 2006). Les différents traitements appliqués aux données satellitaires comprennent le géoréférencement des images, le rehaussement spatial, la photo-interprétation, l'analyse en composantes principales et la classification multispectrale pour l'extraction de l'information (Dia et al., 2006b).

2.2.3 Résultats

Le traitement et l'analyse de l'imagerie Spot ont permis de dégager les éléments les plus pertinents du paysage et de dresser des cartes d'occupation du sol. Parmi les surfaces en eau, certaines ne sont pas liées aux inondations (eaux de débordement du fleuve dû à la forte crue et eaux de pluie stagnantes). Le croisement des cartes d'occupation du sol tirées, d'une part de l'image d'octobre 1999 (inondation) et, d'autre part, de l'image d'octobre 2001 (image de référence, prise en l'absence d'inondation) a permis de restituer les surfaces réellement inondées en 1999. L'extraction des couches-vecteurs des inondations de 1998 et 1999 et leur superposition ont permis de comparer la situation de ces deux années. La carte obtenue révèle, entre autre, que l'ampleur de la catastrophe d'inondation a été beaucoup plus importante en 1999 qu'en 1998. Par ailleurs, elle montre les zones qui sont affectées lors de chaque crise, et par conséquent celles qui sont les plus vulnérables (Dia *et al.* 2006b).

2.3 Cartographie radar en zone côtière

Disponibles dès 1992, les images du radar à synthèse d'ouverture (RSO) d'ERS (European Remote Sensing Satellite) ont été utilisées pour réaliser des spatiocartes qui permettent d'uniformiser les couvertures cartographiques régionales et locales (Rudant *et al.*, 1996 et 1997 ; Cantou et Tonon, 1997). L'exploitation de l'imagerie satellitaire sur les bordures littorales, comme par exemple en Guyane et au Cameroun, a permis la mise à jour de plusieurs cartes marines du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, France) (Trébossen *et al.*, 2001 ; Trébossen, 2002). La base de données optiques sur Saint Louis a été enrichie par des données radar acquises dans le cadre du programme TIGER de l'Agence Spatiale Européenne. L'objectif général était d'évaluer l'apport du radar au suivi et à la cartographie de l'évolution côtière de la Langue de Barbarie et de l'estuaire du fleuve Sénégal, suite à l'ouverture en octobre 2003 d'un canal de délestage anti-inondation au sud de la ville (Bâ et al., 2007 ; Wade et al., 2007)

2.3.1 Base de données radar

Elle comprend une série multitemporelle d'images radar couvrant la ville de Saint-Louis et ses alentours (tabl. II) et prises entre le 8 mars 2003 (avant l'ouverture du canal de délestage) et le 21 janvier 2006 (après l'ouverture du canal).

2.3.2 Méthodologie

La méthodologie de traitement des données radar comprend quatre étapes Stroobants, 1999; Trébossen, 2002) : 1) le géopositionnement des images radar ; 2) les traitements radiométriques ; 3) l'interprétation des images et l'extraction de l'information, et 4) la fusion de l'information.

2.3.3 Résultats

L'analyse et l'interprétation de la série d'images multidates radar ont permis de cartographier les différentes unités du paysage littoral (dunes, cordons littoraux), le trait de côte, les zones d'érosion et de sédimentation. Ces différentes surfaces se distinguent sur les images radar en fonction de leur texture (fine, moyenne ou grossière), leur géométrie, leur radiométrie et leur orientation. Par ailleurs, la comparaison entre elles des images de la série montre la fermeture progressive de l'ancienne embouchure du fleuve par colmatage par les apports de sable de la dérive littorale et des sédiments fluviaux (fig. 2).

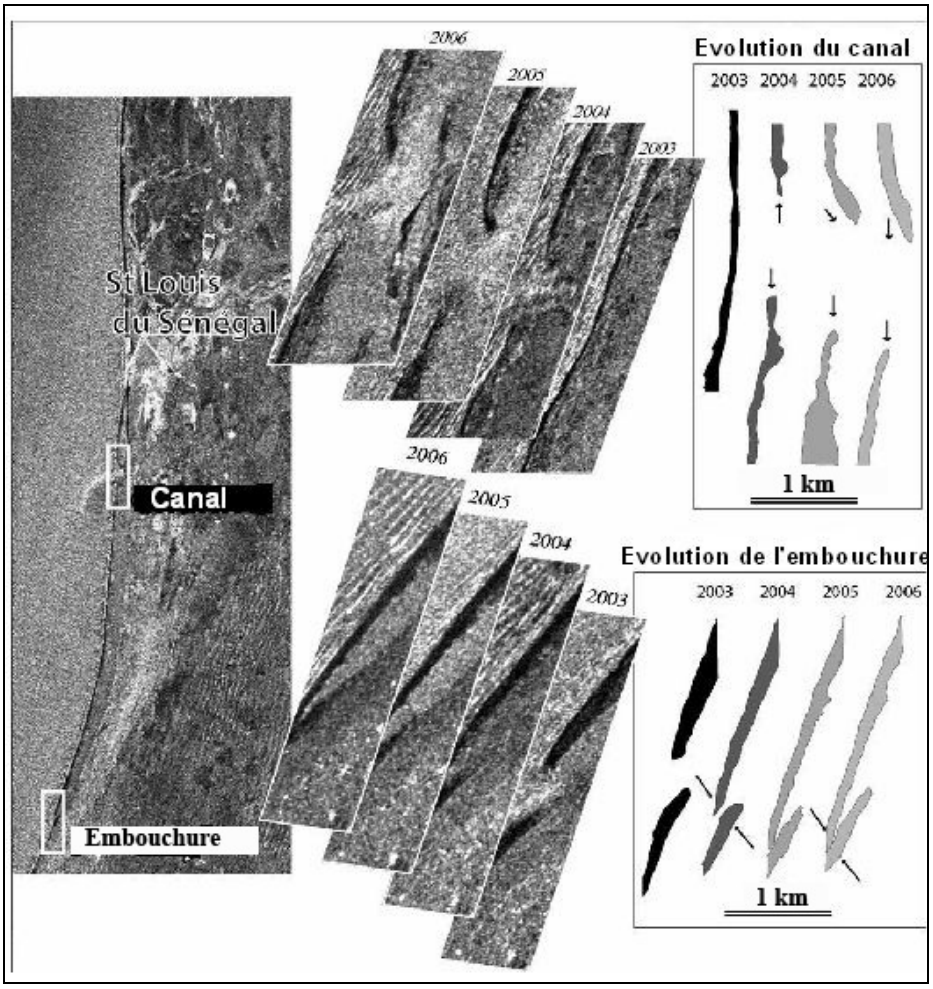


Figure 2 : Evolution de l'embouchure du fleuve Sénégal et du canal de délestage, suivie grâce à une série multidate d'images radar

De son côté, le canal de délestage n'a pas cessé de s'élargir depuis son ouverture à cause de l'action combinée des houles et des eaux du fleuve qui se déversent en mer. Sa largeur est passée ainsi de 4 m à plus de 1000 m dans la période 2003-2006 (Bâ *et al*., 2007 ; Wade *et al*., 2007).

Devant l'indisponibilité de l'imagerie optique dans certaines conditions météorologiques, la base de données du projet a été enrichie par des acquisitions d'images radar disponibles en tout temps, grâce à l'indépendance par rapport à l'illumination solaire et la capacité des rayonnements micro-ondes de traverser l'atmosphère sans grosses perturbations. L'imagerie radar apporte des informations pertinentes sur les unités de paysage (réseaux hydrographiques et routiers, structures urbaines, etc.), la géomorphologie, certains types de végétation et de sols, les principaux thèmes côtiers (trait de côte, cordons dunaires, plage, etc.), les phénomènes d'ensablement du chenal d'embouchure, d'engraissement et

d'érosion autour du canal de délestage, l'état de surface de la mer (vaguelettes, houle, etc.), les états et la nature de l'eau (calme ou turbide, claire ou chargée).

3. L'EROSION HYDRIQUE ET LE RAVINEMENT A NIORO

La zone d'étude (coordonnées géographiques du centre : 15° 50' de longitude Ouest ; 13°45' de latitude Nord) est localisée dans le bassin versant du « Petit Bao Bolon » dont la partie orientale est occupée par Nioro du Rip, petite ville du centre-ouest du Sénégal. La localité rencontre d'énormes problèmes liés à l'érosion hydrique qui ravine les sols d'une manière spectaculaire, entraînant la perte de terres habitables et arables et l'effondrement d'édifices publics et de maisons (fig. 3).

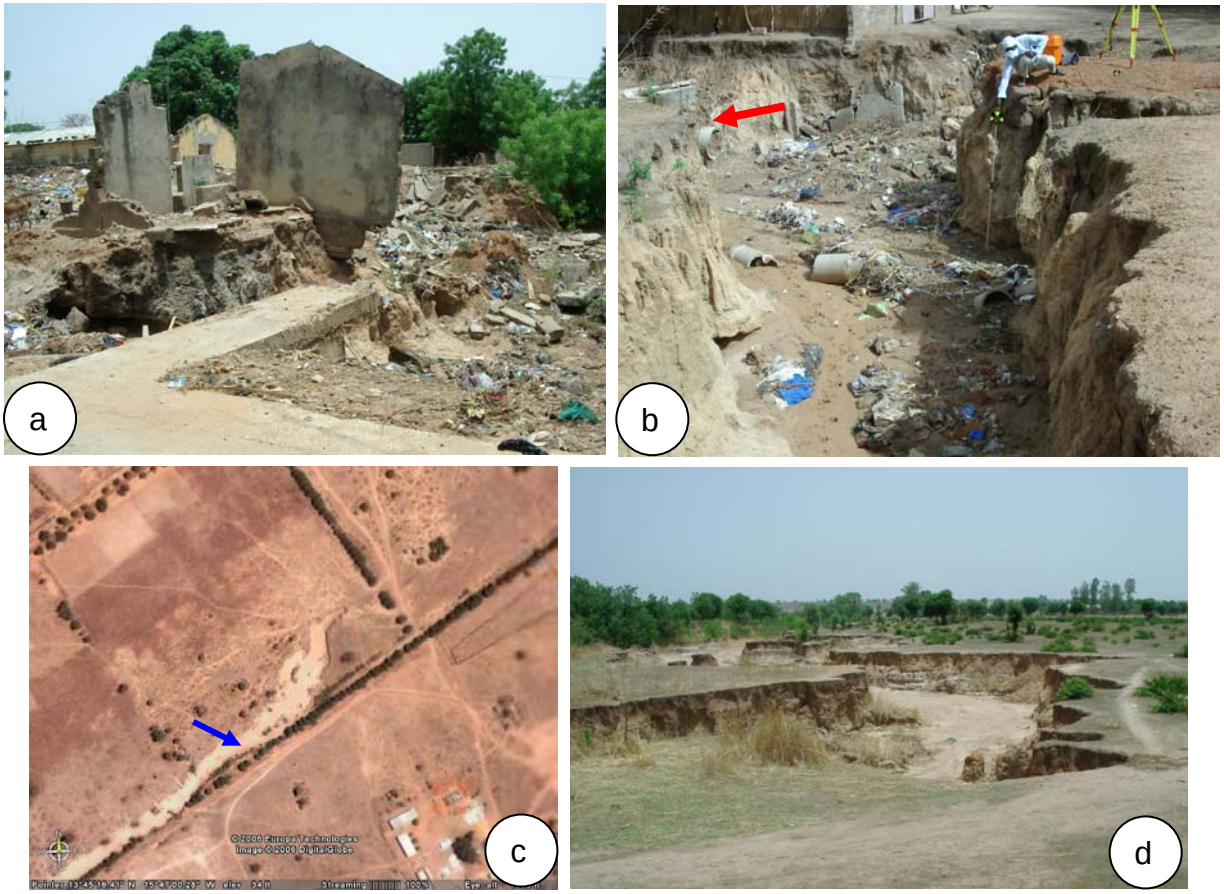


Figure 3 : Exemples de dégâts causés à Nioro par l'érosion hydrique et le ravinement associé. a : maison effondrée ; b : tuyau de canalisation sectionnée (flèche rouge) ; c et d : perte de terres agricoles (c : vue du ravin de l'ISRA (flèche bleue) sur image Google Earth ; d : photo de terrain)

Le ravinement est dû au ruissellement des eaux de pluie qui traversent la ville d'Est en Ouest pour se déverser dans le Bolon (NDoye, 2006).

3.1. Base de données et méthodologie

La base de données comprend : (1) une image SPOT-4 acquise le 19 Décembre 2002 et exploitée pour la cartographie de l'occupation du sol ; (2) une image « Google Earth » pour visualiser le détail des zones affectées par les ravins ; (3) des données radar d'amplitude (2 scènes ERS-1 et 10 scènes ERS-2) et des couples interférométriques en cours de traitement pour la détection des changements intervenus entre 1993 et 2005, la cartographie de l'érosion en nappe à partir des images de cohérence interférométrique ; (4) une photographie aérienne du 9 janvier 1997 utilisée pour l'extraction de l'urbain et du réseau routier ; (5) une carte morphopédologique au 1/100 000 pour l'extraction d'informations sur les sols de la zone d'étude. Les facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique sont le climat, les sols, la topographie, le couvert végétal et l'occupation du sol. L'intégration de ces facteurs dans des modèles permet de quantifier et/ou de cartographier l'érosion, bien que l'approche méthodologique, ainsi que la pondération de chaque paramètre soient spécifiques à la région étudiée (Warren, 2002 ; Vrieling, 2002). La méthodologie utilisée est basée sur l'équation universelle de pertes de sols de Wishmeier et Smith (1978). Elle est bâtie sur deux niveaux : la carte de

sensibilité à l'érosion et la carte des zones à risque d'érosion, dérivée de l'intégration de la carte de sensibilité avec la carte d'occupation du sol (NDoye, 2006).

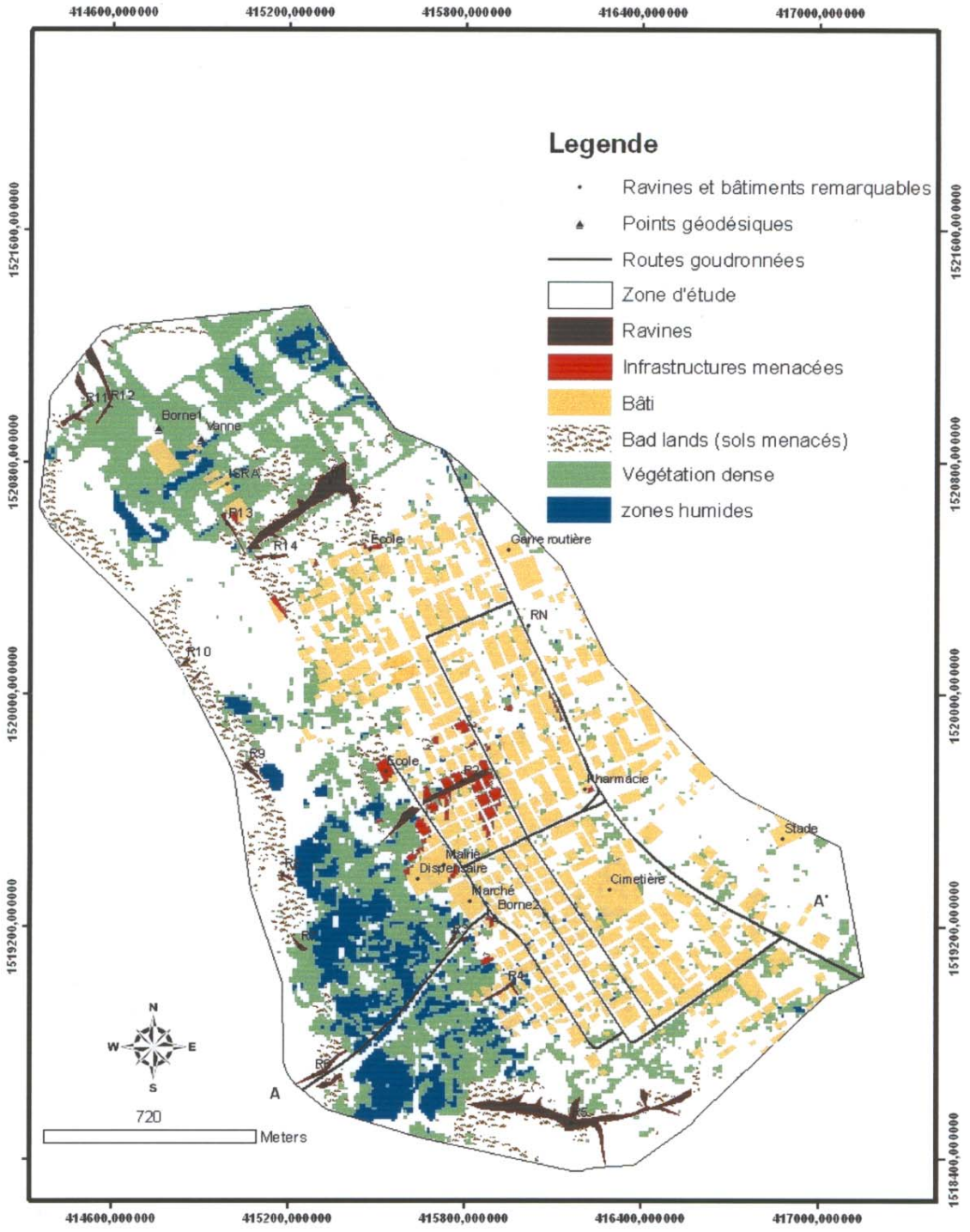


Figure 4. Carte des zones à risque d'érosion hydrique par ravinement

3.2. Résultats

La carte de sensibilité à l'érosion, obtenue par intégration des données de pente, d'érosivité des pluies et d'érodabilité des sols, met en évidence quatre zones : (1) une zone de faible sensibilité à l'érosion, caractérisée par de faibles pentes de terrain (0-2%) et une faible érodabilité des sols faible (k = 0,015). Cette zone est essentiellement constituée par les sols hydromorphes du lit mineur inondable de l'émissaire du « petit Bao Bolon ». Cette vallée alluviale est en réalité une zone d'accumulation sédimentaire et non une zone d'érosion ; (2) une zone de sensibilité intermédiaire. La susceptibilité à l'érosion y est faible et l'érodabilité des sols très élevée (k = 0,026-0,057). Il s'agit des sols rubéfiés, des sols rouges, et des sols peu évolués qu'on trouve respectivement à l'ouest, au sud et à l'est du site d'étude. Ces secteurs sont probablement sujets à l'érosion en nappe ; (3) une zone très sensible à l'érosion, couvrant une bonne partie du site, caractérisée par des pentes fortes (2-5% pente) et une très forte érodabilité des sols (k > 0,022). Elle est représentée par les sols rouges et les sols beiges qui sont les plus affectés ; (4) les bordures instables de ravines,

caractérisées par les plus fortes pentes du secteur (2-12%). Au total on peut dénombrer sur la carte des zones à risque plusieurs bâtiments affectés par les ravins (fig. 4), parmi lesquels deux écoles, le nouvel hôpital, la pharmacie, de nombreuses maisons, des installations du Centre de Recherches Agricoles ISRA.

En somme, le site de la ville de Nioro du Rip concentre beaucoup de facteurs favorables à l'érosion et au ravinement. En plus d'être le théâtre de pluies torrentielles très agressives, la ville est bâtie sur des sols très sensibles à l'érosion, avec des pentes souvent supérieures à 2%. L'adaptation du modèle de Wischmeier et Smith (1978) a permis d'identifier des zones à risque où les ravins existants confirment la validation du modèle (NDoye, 2006).

4 CONCLUSION

Les résultats présentés dans cet article démontrent la pertinence de l'imagerie satellitaire pour la cartographie des zones inondées. Quand l'optique fait défaut à cause des conditions météorologiques, l'imagerie radar « tout temps » assure la disponibilité de l'information. Le traitement et l'analyse d'une série multidate (2003-2006) de données radar SAR de ERS de la zone d'étude, acquises à des saisons et à des niveaux de marée différents, ont permis d'identifier un ensemble d'éléments qui peuvent renseigner les cartes topographiques et bathymétriques de la zone : unités végétales et géomorphologiques, structures urbaines, réseaux hydrographique et routier, trait de côte. Ces données ont aidé à mieux comprendre les phénomènes de sédimentation et d'érosion, ainsi que les évolutions du paysage littoral. Par ailleurs, la comparaison des images multidates entre elles a permis de mesurer les mouvements du trait de côte le long du littoral de la Langue de Barbarie, de suivre l'évolution de l'ancienne embouchure du fleuve jusqu'à sa fermeture complète en 2006, ainsi que l'élargissement du canal de délestage qui de 4 mètres à son creusement en 2003, fait en 2006 plus d'un millier de mètres de large.

S'agissant de l'étude des processus d'érosion hydrique et du ravinement associé, l'approche cartographique mise en œuvre s'est avérée être un outil pertinent d'aide à la décision dans la recherche de solutions au problème du ravinement. Les travaux en cours mettent l'accent sur le traitement et l'analyse de données multidates radar d'amplitude et de couples de données interférométriques, pour l'étude des changements à l'échelle régionale, ainsi que l'identification et la caractérisation des différents types d'érosion hydrique qui affectent la région.

Références bibliographiques

BA K., WADE S., NIANG I., TREBOSSEN H., RUDANT J.P., 2007 - Cartographie radar en zone côtière à l'aide d'images multidates RSO d'ERS-2 : application au suivi environnemental de la Langue de Barbarie et de l'estuaire du fleuve Sénégal. *Télédétection* 2007, 7 (1-4)

BACH H., LAMPART G., STRASSER G., MAUSER W., 1999 - First results of an integrated flood forecast system based on remote sensing data. *Proceedings of IGARSS'99*, 864-866.

BEGUEC J., 2006 - Diffusion et tatouage des données géographiques. *Mémoire Master-2 SIG*, Université de Marne la Vallée, 54 p.

CANTOU J.-P. et TONON M., 1997. Cartographie radar de la Guyane : vers une chaîne de production opérationnelle. *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection* n° 148, p. 36-43.

BLASCO F., BELLAN M.F., CHAUDHURY M.U., 1992 - Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT data. *Remote Sensing of Environment* 39(3), 167-178.

CHAUMON M., 2005 - Urbanisme et aménagement urbain : impact sur les inondations de Saint Louis. *Mémoire DESS univ. Paris 1*, 127 p.

DIA A.M., KOUAME J., WADE S., RUDANT J.P., 2006a - Application of Remote Sensing and GIS in natural disaster risk management : Case study of the Senegal river flood monitoring project (GESCAN). *Communication and poster to the International Disaster Reduction Conference (IRDC).* Davos, Switzerland, August 27th – September 2, 2006.

DIA A.M., WADE S., DEROIN J.P., FRISON P.L., KOUME J., RUDANT J.P., 2006b - Apport des données SPOT et Landsat au suivi des inondations dans l'estuaire du fleuve Sénégal. *Photointerpretation*, 2006/4, pp. 35-46

FLOUZAT G., PUECH C., DARTUS D., 2003 - Les observations par satellite pour l'analyse et le suivi du fonctionnement des hydro-systemes, *Bulletin de la SFPT*, n°172 (2003-4), pp. 3-10.

KOUME J., 2006 - Apports de l'imagerie satellitaire à la mise à jour de l'information géographique dans les pays de la ceinture tropicale : études de cas en Guyane française, Sénégal, Cameroun et Niger. *Thèse doct. Univ. Marne-la- Vallée*, 241 p.

MARINELLI L., MICHEL R., BEAUDOIN A., 1997 - Flood mapping using ERS tandem coherence image : a case study in souther France. In *third ERS Symposium on Space at the service of our environment*, Florence, Italie, 17-21 march 1997, p. 531-536.

MEYER C., GELDREICH P., YESOU H., 2001. Apport des données simulées SPOT 5 pour l'évaluation des dégâts de tempête dans la forêt de Haguenau (Alsace, France). Conférence SPOT 5 « vers de nouvelles applications », Toulouse 27-28 novembre 2001.

NDOYE B., 2006 - Analyse et évaluation de l'érosion hydrique et du ravinement associé dans la ville de Nioro du Rip (Sénégal) par Télédétection et SIG. *Mémoire Master-2 SIG*, univ. Marne la Vallée, 81 p.

ONANA V.P., RUDANT J.P., ETOUNA J., WADE S., 2005 - Dynamique urbaine à l'aide d'images RSO de ERS et HRV de SPOT et son impact dans les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain: cas de la ville de Douala (Cameroun). *Télédétection*, 5 (1-2-3), p. 19-32

ORTOLANI A., FRANCESCO M. 2000 – Validating soil moisture estimation with ERS PRI data : operational use in DECIDE, a decision support system for floods. ERS-ENVISAT Symposimu "Looking down the Earth in the New Millenium", Gothenbhurg, Sweden 16-20 October 2000.

PUECH C., 1995 - Suivi des inondations en Afrique du Nord à l'aide de la télédétéction satellitaire. In *9ème Conférence régional Afro-asiatique de la CIID*, Alger, 1995, 7p.

PUECH C. et RACLOT D., 2002 - Using geographical information systems and aerial photographs to determine water level during floods. *Hydrological Processes*, Vol. 16 (08), 1593-1602.

RANGO A., SALAMONSON V.V. 1974 - Regional flood mapping from space. *Water Resources Res.*, 10(3), 473-484.

RUDANT J.-P., DEROIN, J.-P. et BALTZER, F., 1996 - Apport des images radar satellitaires ERS1 et JERS1 dans le domaine de la cartographie générale et thématique en contexte tropical humide. *Bulletin Société française de photogrammétrie et télédétection*, n° 142, p.15-31.

RUDANT, J.-P., HAUTECLOQUE, H. et PENICAND, C., 1997 - Potentiel d'exploitation des spatiocartes radar : exemple de la Guyane. *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection*, n° 148, p.44-45.

SANDHOLT I., BJARNE F., 2000 - Flood monitoring in the Senegal river valley: first results based on SAR PRI data. *ERS-ENVISAT Symposium* "Looking down the Earth in the New Millenium". Gothenbhurg, Sweden 16-20 October 2000

SCHNEIDER, T., 2000 – Evaluation of multispectral radar data for the mapping of inundation dynamics in the Save flood plain (Croatia). *ERS-ENVISAT Symposium* "Looking down the Earth in the New Millenium", Gothenbhurg, Sweden 16-20 October 2000.

STROOBANTS, W., 1999 - Apport des données RSO à la production cartographique en contexte tropical humide, *Thèse de doctorat* Université de Marne-la-Vallée, Marne-la-Vallée.

TREBOSSEN, H., RUDANT, J.-P. et CLASSEAU, N., 2001 - Problèmes posés par la mise à jour de la cartographie marine en zone tropicale humide à partir de données radar à synthèse d'ouverture, exemple en Guyane française et au Cameroun. *Bulletin Société française de photogrammétrie et télédétection*, n° 161, 2001-1, p. 29-39.

TREBOSSEN, H. (2002) Apports des images SAR à la cartographie marine, *Thèse Doctorat* Université de Marne-la-Vallée, Marne-la-Vallée, 172 p.

VRIELING A., et al. 2002. Erosion risk mapping: a methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57, p. 158-163.

WADE S., DIOP S., FAYE S., RUDANT J.P., SY A.B.D., DIALLO A.H., DIA A.M., GAFFURI J., KOUAME J., - 2004a. Les données des satellites d'observation de la Terre au service de la gestion des ressources en eau: études de cas au Sénégal. *GEO OBSERVATEUR* N°13, Novembre 2004

WADE S., ONANA V.P., RUDANT J.P., GAFFURI J., DIA A.M., KOUAME J., NGAH-ASSE, ETOUNA J., 2004b. Application de la Télédétection et des SIG à la gestion des inondations de la ville de Saint-Louis au Sénégal : résultats préliminaires. *Communication Xèmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF*, 24-29 Mai 2004 , Ottawa (Canada). « Géorisque et Télédétection/Les eaux dans un bassin versant ».

WADE S., BA K., TREBOSSEN H., NIANG I., RUDANT J.P., 2007a - Coastal zone mapping using multitemporal ERS SAR and ENVISAT ASAR data. *Proceedings ENVISAT Symposium 2007*, Montreux, Switzerland 23-27 April 2007, ESA SP636.

WADE S., NDOYE B., RUDANT J.P., 2007b - Water Erosion assessment around the town of Nioro du Rip (Senegal) using Earth Observation data and GIS. *Communication/Poster Symposium ENVISAT 2007*, Montreux, Switzerland 23-27 April 2007.

WARREN A., 2002 - Land degradation is contextual. *Land Degradation and Development*, Vol. 13, p. 449-459.

WISCHMEIER W.H. and SMITH D.D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses. A guide to soil conservation planning. *USDA-ARS Handbook*, n°537, 58 p.

YESOU H., CHASTENET P., 2000 – Contribution des données d'observation de la Terre à la gestion des crues lentes. *Rapport final WP3*, Programme Eau et Feu, ESA, 35

YESOU H., MEYER C., CLANDILLON S., DE FRAIPONT P., 2001 - Apport des données simulées SPOT 5 pour la gestion du risque d'inondation. *Bull. SFPT*, 151-161