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

Kader BÂ[1], Souléye WADE[2], Isabelle NIANG[1], Hervé TRÉBOSSEN[3] et Jean-Paul RUDANT[4]

[1]Département de géologie, Faculté des sciences et techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, B.P. 12524, Dakar Fann, Sénégal.
Téléphone : (221) 539 55 58 ; 825 07 36 courriel : ngathie5273@yahoo.fr ; isabelleniang@yahoo.fr
[2]Laboratoire de télédétection appliquée, Institut des sciences de la Terre, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, B.P. 5396, Dakar-Fann, Sénégal.
Téléphone : (221) 825 25 30/(221) 579 41 47 ; télécopieur : (221) 824 63 18 ; courriel : wadesouleye@yahoo.fr
[3]Centre régional AGRHYMET, B.P. 10111, Niamey, Niger.
Courriel : h.trebossen@agrhymet.ne
[4]Laboratoire G2I, Institut francilien des sciences appliquées, Université de Marne la Vallée, 5, boulevard Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, cedex, France.
Téléphone : 33(0)1 49 32 90 42 ; télécopieur : 33(0)1 49 32 91 37 ; courriel : jean-paul.rudant@univ-mlv.fr

Soumis le 26 janvier 2007 ; révisé le 8 mars 2007 ; accepté le 29 août 2007 - © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 129-141

Résumé

Cet article présente une synthèse des résultats obtenus à partir des données du radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite européen ERS-2 appliquées à la cartographie du littoral de la Langue de Barbarie, dans la région de Saint-Louis du Sénégal. La ville de Saint-Louis connaît beaucoup de problèmes environnementaux, parmi lesquels des inondations récurrentes et de plus en plus catastrophiques. Ces problèmes sont en partie liés au contexte de ville « amphibie », installée en partie sur une île fluviale, en partie sur la flèche littorale de la Langue de Barbarie qui sépare le fleuve Sénégal de l'océan Atlantique, et en partie sur la rive gauche du fleuve. En octobre 2003, un canal de délestage fut ouvert dans la Langue de Barbarie pour sauver la ville des inondations. Quelles sont les conséquences d'un tel aménagement sur l'estuaire, la zone maritime et le littoral ? Pour répondre à cette question, une étude d'impact a été faite à l'aide de l'imagerie satellitaire. Elle constitue une étape importante de la mise à jour des cartes marines de la zone. Une série multidate d'images radar a subi des traitements géométriques (géopositionnement) et radiométriques (filtrage multidate) dans le système WGS84, Zone 28N. Après interprétation, les données ont été intégrées dans un système d'information géographique. L'analyse de l'imagerie radar a permis d'identifier les unités végétales et géomorphologiques, les structures urbaines, les réseaux hydrographique et routier, la ligne de rivage et la flèche littorale. Elle a aussi permis de mettre en évidence les phénomènes d'engraissement et d'érosion affectant la Langue de Barbarie. Ce sont autant d'éléments qui peuvent améliorer les cartes topographiques et bathymétriques de la zone.

Mots clés : RSO, ERS, cartographie radar, canal de délestage, Langue de Barbarie, Saint-Louis, Sénégal.

Coastal zone radar mapping with multitemporal ERS-2 SAR data: application to the environmental monitoring of the Langue de Barbarie sand spit and the Senegal river estuary

This paper presents the preliminary results obtained using a time-series of radar ERS-2 SAR dataset (Synthetic Aperture Radar of the European Remote Sensing Satellite), applied to coastal zone radar mapping of the Langue de Barbarie sand spit in the area of Saint-Louis. The city of Saint-Louis experiences a number of environmental problems,

among which recurrent floods that are becoming increasingly catastrophic. Thus situation is partly due to its geographical location partly on a fluvial island, partly on the Langue de Barbarie sand spit, which separates the Senegal river from the Atlantic ocean, and partly on the left river bank. In October 2003, expecting a severe disaster, a channel was dug in the Langue de Barbarie to avoid catastrophic flooding of the town. In order to understand the consequences of this channel on the estuary, the maritime zone and all along the coastal zone of Saint Louis, an environmental impact assessment was conducted using satellite images. This study constitutes an important step in the updating of marine charts of the zone. SAR PRI radar data underwent geometric and radiometric corrections, analysis and interpretation, before being integrated into a Geographic Information System. The radar imagery allowed the identification of various elements of the study zone (vegetation units, geomorphologic units, urban structures, road and hydrological networks, coastline and sand spit), and, the determination of accretion and erosion movements along the Langue de Barbarie sand spit. Such elements can be used to update topographic maps and bathymetric charts of the area.

Key words : SAR, ERS, radar mapping, artificial breach, Langue de Barbarie, Saint-Louis, Senegal

1. INTRODUCTION

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 aux niveaux régional et local (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).

À Saint-Louis du Sénégal, la présence d'une flèche littorale, appelée Langue de Barbarie, ainsi que la faible altitude de la ville (moins de 2 m au-dessus du niveau moyen de la mer), sont des facteurs favorisant les inondations observées dans la ville et ses environs (Wade et Rudant, 2001 ; Dia *et al*., 2006). En octobre 2003, à la suite d'une bonne pluviométrie enregistrée dans le bassin du fleuve Sénégal, le niveau d'eau à Saint-Louis a fortement augmenté pour atteindre la cote d'alerte de 2 m, entraînant ainsi le débordement du fleuve dans tous les points bas. L'arrivée d'une lame d'eau importante ayant été annoncée et pour éviter à la population les conséquences d'une inondation prévisible, les autorités ont décidé d'ouvrir, dans la nuit du 3 octobre 2003, un canal de délestage dans la Langue de Barbarie, à 7 km en aval de la ville. À l'origine, celui-ci avait 100 m de longueur, 4 m de largeur et 1,5 m de profondeur (Diop, 2004). L'ouverture de cette brèche a certes permis d'abaisser le niveau d'eau de 1 m, mais les actions conjuguées du fleuve et de la mer ont par la suite modifié rapidement la largeur du canal qui atteint aujourd'hui environ 1 500 m, ainsi que la profondeur qui fait maintenant 6 m. Compte tenu de la rapidité et de l'ampleur des processus, les données cartographiques intégrées dans un système d'information géographique (SIG) sont nécessaires pour comprendre les impacts du canal de délestage.

De nombreux auteurs se sont intéressés au suivi et à l'évaluation de certains processus opérant dans l'environnement de l'estuaire du fleuve Sénégal, tels que l'érosion côtière, la migration de la flèche littorale ou les inondations (Guilcher et Nicolas, 1954 ; Sy, 1981 ; Sall, 1982 ; Kane, 1985 ; Niang-Diop, 1995 ; Soumaré, 1996 ; Diaw, 1997 ; Dia *et al*., 2006), mais seuls quelques uns ont utilisé l'imagerie satellitaire et aucun l'imagerie radar.

C'est dans ce contexte que les projets CORUS/GESCAN (Coopération pour la recherche universitaire et scientifique/Gestion des catastrophes naturelles par télédétection et SIG) d'abord et TIGER/TREES (Télédétection des ressources en eau et de l'environnement au Sénégal), projet inscrit dans l'initiative TIGER de l'Agence spatiale européenne (ESA) ont ensuite été mis en place avec, comme objectif général, l'évaluation de l'apport des données satellitaires optiques et radar au suivi et à la cartographie de l'évolution côtière de la Langue de Barbarie et de l'estuaire, en relation avec l'ouverture du canal de délestage au sud de la ville. Les objectifs spécifiques consistent à :

- démontrer l'intérêt cartographique de l'imagerie radar, en synergie avec l'imagerie optique et la photographie aérienne (Dia *et al*., 2006), pour le suivi de l'évolution côtière, notamment celle du canal de délestage creusé dans la Langue de Barbarie, de l'évolution des îles situées dans l'estuaire, des unités de végétation ainsi que de la formation et du déplacement des bancs sableux et vaseux au niveau de l'embouchure et dans l'estuaire du fleuve Sénégal ;
- utiliser ces résultats pour la mise à jour des cartes bathymétriques des petits fonds ;
- proposer un document cartographique actualisé, prenant en compte la dynamique récente de la Langue de Barbarie, de l'embouchure et de l'estuaire du fleuve Sénégal.

L'analyse des images radar multidates acquises à des saisons et à des niveaux de marée différents permet de mieux comprendre les phénomènes de sédimentation et d'érosion, ainsi que les évolutions du paysage littoral. Par ailleurs, la comparaison de ces images entre elles permet de mesurer le mouvement de la ligne de rivage le long du littoral de la Langue de Barbarie. La ligne de rivage est définie dans cette étude par le niveau moyen de marée haute. Ce niveau est continu le long du littoral, mais il est également identifiable sur les images satellitaires. Il représente la limite entre la

terre et l'eau, c'est-à-dire entre les parties mouillées (apparaissant en gris foncé sur les images) et les parties sèches (apparaissant en gris clair ou blanc) de la plage.

2. SITE D'ÉTUDE

La Langue de Barbarie est une flèche littorale présente dans le delta du fleuve Sénégal au niveau de la région de Saint-Louis, entre les latitudes 16°23' et 16°35' N et les longitudes 15°45' et 16°15' O. C'est un long cordon sableux, de 100 à 500 m de largeur, avec des hauteurs variant entre 2 et 7 m au-dessus du 0 de l'IGN (figure 1). Cette flèche sépare le fleuve Sénégal de l'océan Atlantique sur une longueur d'environ 30 km au sud de la ville de Saint-Louis. La dynamique sédimentaire est forte et dominée par les processus marins. En effet, en période de crue, le fleuve mobilise environ 2 000 000 t de sédiments fins qu'il dépose essentiellement dans l'estuaire, le reste étant exporté sur le plateau continental pour alimenter une vasière (Pinson-Mouillot, 1980) alors que la dérive littorale charrie entre 600 000 et 1 000 000 t/an de sable le long du littoral. Ces apports sédimentaires fluvio-marins engendrent des perturbations, telles que le recul du rivage externe de la Langue de Barbarie, la sédimentation de bancs de sable et l'ensablement du chenal d'embouchure, ce qui rend difficile la navigation fluviale et modifie la position de l'embouchure.

Pendant longtemps, le fonctionnement de la flèche littorale est resté naturel, marqué par des processus d'érosion sur son littoral externe (à des taux compris entre 1 et 2 m par an), mais surtout par des phénomènes de migration vers le sud de son extrémité distale (à des vitesses variant entre 200 et 650 m par an). Ces phénomènes déterminaient la position de l'embouchure et étaient interrompus par des coupures périodiques (35 répertoriées entre 1820 et 1973) de la flèche littorale (Bâ, 2004). La mise en eau du barrage de Diama, à environ 20 km au nord de Saint-Louis, en 1987, semble avoir anthropisé ce fonctionnement. On assiste ainsi à une accélération de la progression vers le sud de la flèche (plus de 1 km par an) qui n'est plus compensée par les coupures (Bâ, 2004). L'ouverture d'un canal de délestage à 7 km au sud de la ville, le 4 octobre 2003, constitue une nouvelle pression anthropique sur le fonctionnement de cet environnement littoral particulier.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude. *Location of the study area*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les données satellitaires exploitées dans cette étude comprennent sept images prises avec le radar à synthèse d'ouverture (RSO) d'ERS-2, entre 2003 et 2006 (tableau 1). Les données ont été corrigées géométriquement et radiométriquement. Elles ont ensuite fait l'objet d'une interprétation puis intégrées dans un système d'information géographique (SIG).

Tableau 1 : Caractéristiques des images RSO d'ERS-2. Données de type PRI (Precision image) en mode descendant. *Characteristics of ERS-2 SAR images. PRI type data (Precision image) in descending mode*

Orbite	Date	Heure GMT	Hauteur d'eau (m)	Marée
41202	08-03-2003	11 h 32	1,3	MM
42705	21-06-2003	11 h 33	1,0	MD
46212	21-02-2004	11 h 33	1,5	MM
47214	01-05-2004	11 h 33	0,9	MD
50721	01-01-2005	11 h 32	1,1	MM
53226	25-06-2005	11 h 33	1,7	MD
56232	21-01-2006	11 h 32	1,1	MM

MM = marée montante ; MD = marée descendante

3.1. Banque de données

Les images RSO ont été acquises en périodes de marée montante et descendante ; soit deux images par année. Elles couvrent la ville de Saint-Louis et ses alentours et ont été prises entre le 8 mars 2003 (avant l'ouverture du canal de délestage) et le 21 janvier 2006 (après l'ouverture du canal). Elles ont été acquises dans le cadre du projet TIGER/TREES, en soutien à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (tableau 1).

3.2. Méthodologie

La méthodologie mise en oeuvre comprend quatre étapes : 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.

3.2.1. Corrections géométriques et radiométriques

Les corrections géométriques et radiométriques ont été effectuées à l'aide du logiciel Coastmonitor qui est conçu pour faire la rectification géométrique sans points d'appui et le filtrage des images radar d'ERS, d'Envisat et de RADARSAT. Les sept images RSO ont été géopositionnées dans le système géodésique WGS 84 et dans la projection UTM, fuseau 28 Nord. Cette étape a aussi été réalisée à l'aide du logiciel Coastmonitor et de la modélisation physique du capteur RSO d'ERS-2 (Trébossen, 2002 ; Trébossen *et al.*, 2007), par intégration des orbites précises de la Delft of Technology (Scharoo and Visser, 1998), et en prenant en compte un modèle de géoïde, ici l'EGM-96. Par la suite, pour diminuer l'effet de chatoiement et améliorer la lecture, les images d'ERS-2 ont subi un filtrage avec un filtre multidate. L'intérêt principal de ce filtre multidate, mis en oeuvre par Stroobants (1999), réside dans sa capacité de réduire le chatoiement sur les zones macroscopiquement invariables tout en prenant globalement en compte les changements intervenus localement aux différentes dates d'acquisition (figure 2). Cette opération a pour avantages tant de permettre une meilleure discrimination des cibles que de faciliter la segmentation automatique des images et la détection des contours pour aider à la classification.

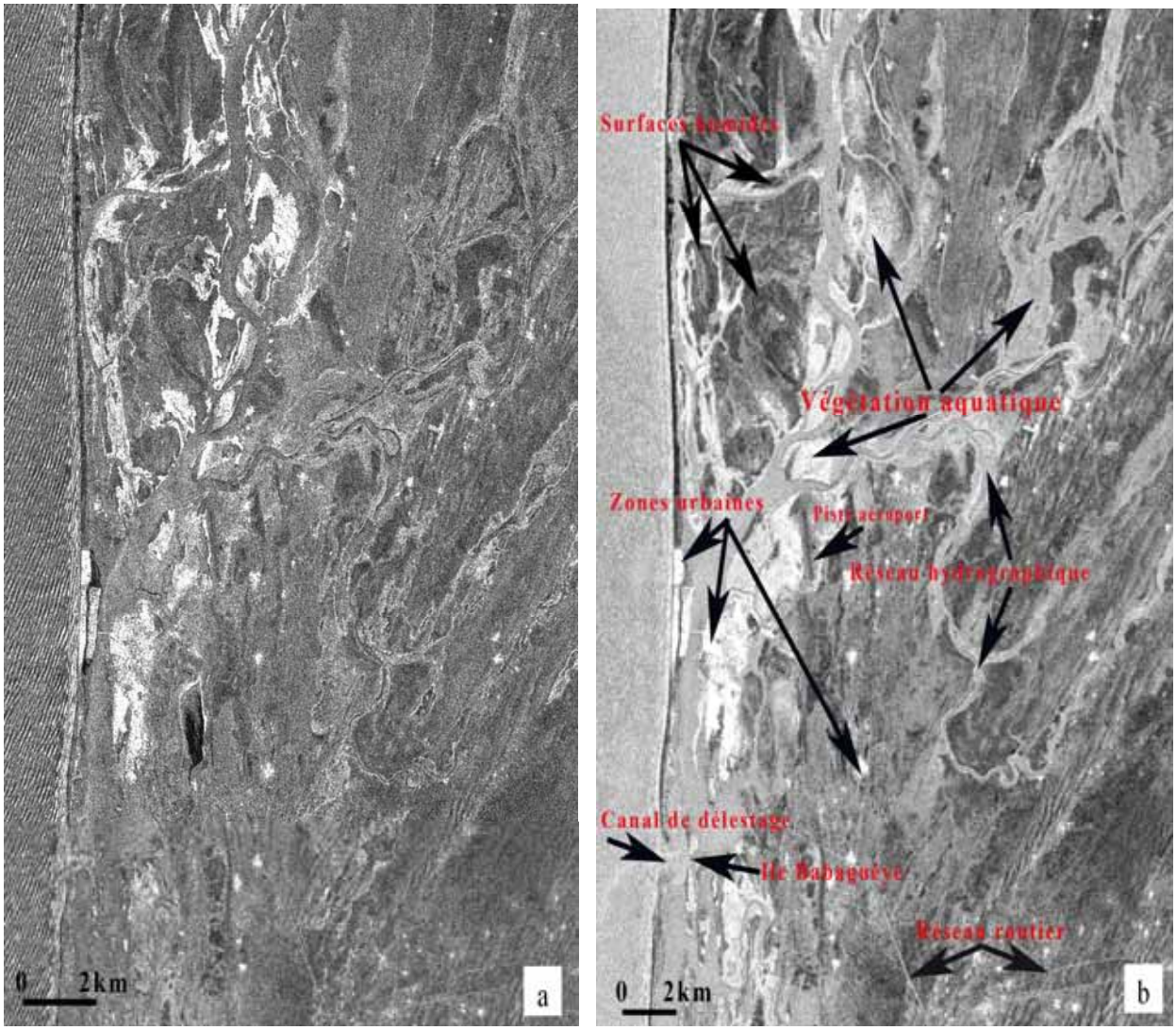


Figure 2 : Filtrage multidate de l'image RSO du 21 janvier 2006. 2a : image brute non filtrée ; 2b : image filtrée. Noter combien la réduction du chatoiement améliore la lisibilité de l'image. *Multitemporal filtering of the January 21, 2006 SAR image. 2a: raw, unfiltered image ; 2b: filtered image. Note how speckle filtering enhances the image.*

3.2.2. Interprétation des images

Cette étape permet d'extraire automatiquement à l'aide du même logiciel Coastmonitor différentes informations, notamment la ligne de rivage, le réseau hydrographique, les structures urbaines et routières, les unités de végétation mais aussi de localiser les zones d'érosion et de sédimentation. À partir de ces données, on peut établir des cartes d'occupation des terres. Des missions de terrain sont programmées afin d'affiner les hypothèses de travail et de lever les doutes sur certaines interprétations.

3.2.3. Fusion des informations dans un SIG et réalisation de spatiocartes

Le but visé par la fusion des informations est la mise à jour partielle d'une carte bathymétrique ancienne dans un système géodésique connu (WGS 84). Les données collectées ont été intégrées dans un SIG sous forme de couches, appelées thèmes, à l'aide du logiciel ArcView 3.2. Ce logiciel permet de fusionner plusieurs données acquises, relatives à un même système (zone 28N) et à des moments différents, afin de faciliter l'interprétation :

- des données anciennes (lignes et sondes bathymétriques, ligne de rivage ou zéro hydrographique, limite de l'estran, etc.) provenant de l'ancienne carte marine marine au 1 : 10 000 (COSEC /SOGREAH, 2002) ;
- des informations récentes (ligne de rivage actuelle, des bancs sableux et leur position, état de l'ancienne embouchure, etc.) obtenues directement sur les images radar.

4. RÉSULTATS

Les traitements des données RSO disponibles ont fourni des images dont l'analyse et l'interprétation permettent d'avoir une idée sur les différentes unités du paysage et les thèmes côtiers de la zone d'étude.

4.1. Analyse et interprétation des paysages

L'amélioration visuelle apportée par le filtrage multidate est bien nette sur l'image du 21 janvier 2006 (figures 2a et b). On y observe :

- une uniformisation des textures qui permet de bien distinguer les différentes formations végétales et les habitats (forte rétrodiffusion) ;

- une bonne visualisation des réseaux hydrographique et routier, ainsi que des aménagements (canal, piste d'aviation, etc.).

L'image du 1er janvier 2005 permet d'observer la présence de vagues ou trains de houles, provenant du NO (houles dominantes à cette période de l'année) en plein océan (figure 3a), au large de la côte. Des phénomènes de réfraction, accompagnés d'une forte diminution de l'énergie de houle sont particulièrement visibles au niveau du canal de délestage (figure 3b) et de l'ancienne embouchure du fleuve Sénégal (figure 3c). Ces houles du NO provoquent, du fait de leur obliquité à la côte, un courant de dérive littorale dirigé vers le sud et un important transport de sables parallèlement à la côte. La composition colorée obtenue à partir des trois images RSO acquises à de faibles hauteurs d'eau (figure 4) montre une grande diversité dans les radiométries en fonction des zones. La comparaison de cette image avec les cartes d'occupation des terres de la zone, aux échelles de 1 : 50 000 (Michel, 1973 ; Chaumon, 2005) et de 1 : 20 000 (Sall, 2006), permet de distinguer différentes formations végétales. Ainsi, en vert, apparaissent les zones de végétation clair-semée, en bleu clair la végétation aquatique, en rouge les marais et marécages, en bleu foncé les aires cultivées et en violet la mangrove.

Sur l'extrait de l'image du 1er janvier 2005, on distingue les zones humides (argileuses) qui se manifestent par un signal de rétrodiffusion très faible (gris foncé), proche de celui du fleuve et du réseau hydrographique, et les terrains moins humides ou secs (dunes, cordons littoraux, etc.), qui présentent une forte rétrodiffusion (gris clair) (figure 5). Ainsi, cette même image permet d'avoir une idée sur les principales unités géomorphologiques présentes dans le delta et qui correspondent aux formations géologiques superficielles quaternaires. Ces dépôts d'origine marine, éolienne ou fluviale, sont constitués de sable, d'argile et de silt. Ils apparaissent sur les images radar avec des radiométries différentes en fonction de leur texture (fine pour l'argile et le silt presque toujours humides, moyenne à grossière pour le sable sec).

Les images radar de la série multidate, traitées avec le filtre multidate puis comparées entre elles, montrent une fermeture progressive de l'ancienne embouchure par ensablement du chenal, alors que la largeur du canal de délestage a augmenté de plus de 1 000 m au cours de la même période (2003 et 2006) (figure 6). On a également pu identifier la présence de bancs sableux entourant l'ancienne embouchure du fleuve (figure 7).

4.2. Extraction de la ligne de rivage

Au niveau de la Langue de Barbarie, le recul de la ligne de rivage et le déplacement des bancs de sable qui entourent tant le canal de délestage que l'ancienne embouchure du fleuve sont facilement cartographiables sur les images radar filtrées (figure 8). Les limites mer-flèche littorale sableuse et fleuve-flèche littorale sont bien visibles. La flèche littorale sableuse s'identifie par une rétrodiffusion très faible qui contraste avec les rétrodiffusions moyenne et forte du fleuve et de l'océan.

Les bancs de sable (en noir, à cause de leur faible réponse) qui entourent les chenaux de l'embouchure et du canal de délestage, peuvent être distingués des zones marine et fluviale, marquées par leur plus forte rétrodiffusion.

De façon générale, les images RSO permettent une bonne cartographie des unités du littoral (cordons sableux, ligne de rivage) de la Langue de Barbarie, soulignées ici par la différence de contrastes entre les eaux marines et les eaux fluviales (rétrodiffusion moyenne), les bancs sableux (faible rétrodiffusion) et la ligne de rivage (rétrodiffusion intermédiaire).

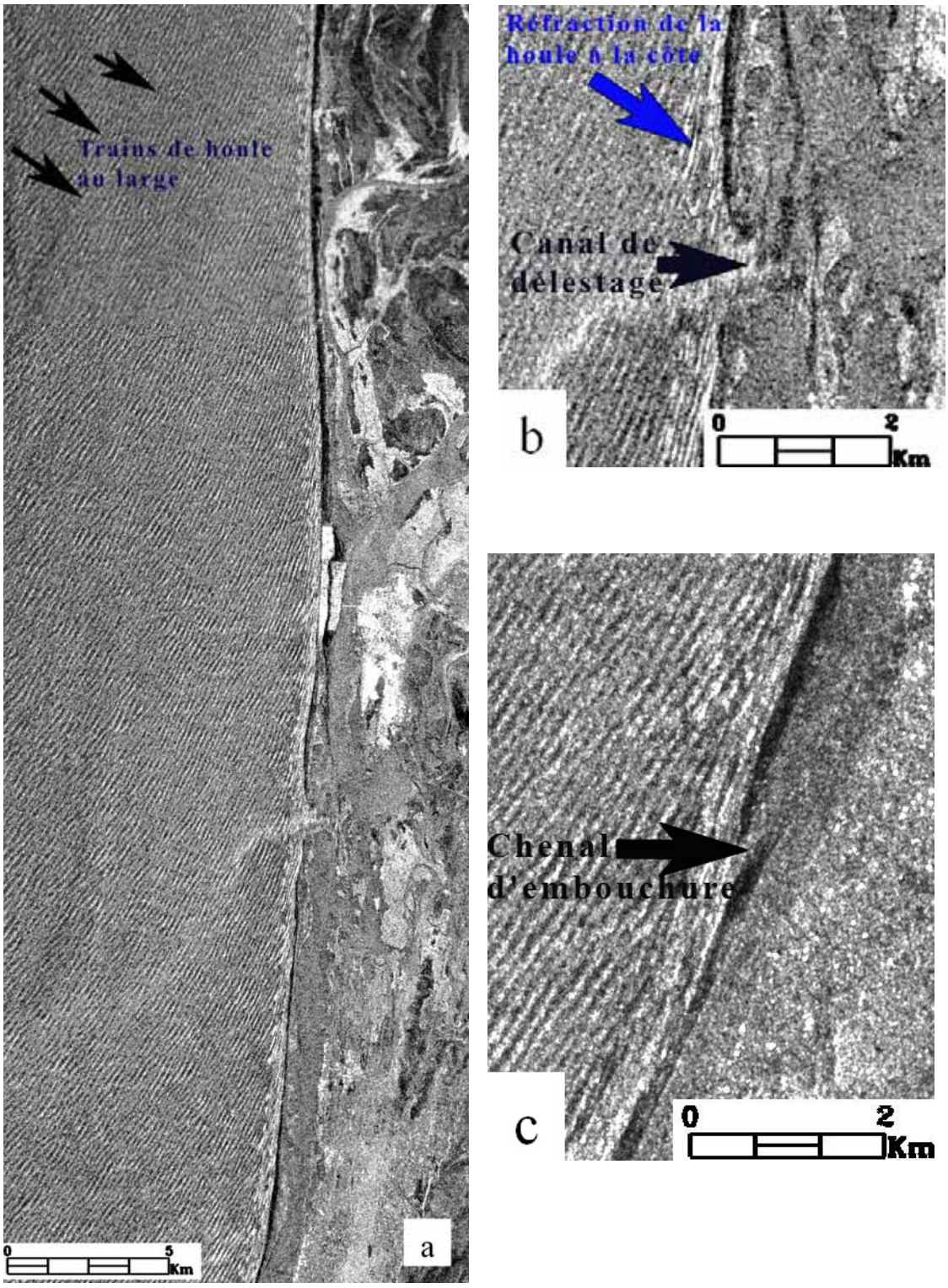


Figure 3 : Extraits de la l'image RSO du 1er janvier 2005. Ondes de surface au large de la côte (3a) ; panache turbide lié à la rencontre des courants marin et fluvial au niveau du canal de délestage (3b) et de l'embouchure (3c) ; les bancs de sable à faible radiométrie sont entourés par des zones de moyenne à forte radiométries représentant la mer et le fleuve. *Subset of January 1, 2005 SAR image. Surface waves far from the coast (3a) ; turbid panache related to the meeting of marine and fluvial currents, at the level of the artificial breach (3b) and the river mouth (3c) ; sand banks with low radiometry are surrounded by areas with mean to high radiometry representing the sea and the river*

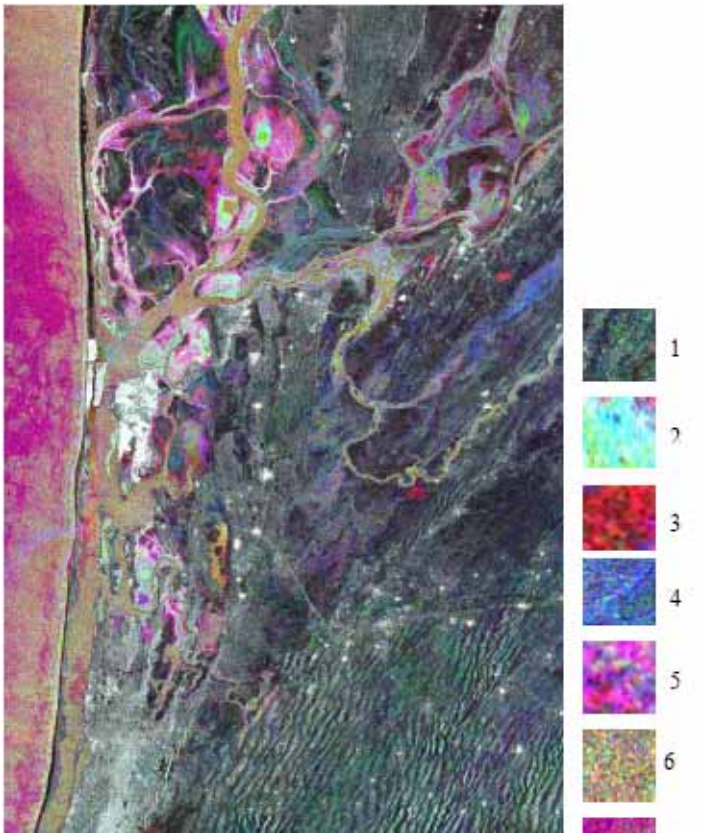


Figure 4 : Extrait de la composition colorée générée à partir des trois dates d'images RSO. Rouge : 25 juin 2005 ; vert : 8 mars 2003 ; bleu : 1er mai 2004. Hauteur d'eau correspondantes : 1,6 m ; 1,3 m et 1,3 m. 1 = végétation clairsemée ; 2 = végétation aquatique ; 3 = marais et marécages ; 4 = aires cultivées ; 5 = océan Atlantique ; 6 = réseau hydrographique. *Subset of the colour composite image generated from three dates of SAR I,mages. Red: June 25, 2005; Green: March 8, 2003; Blue: May 1, 2005. Corresponding water heights: 1,6 m ; 1,3 m et 1,3 m. 1 = Sparse vegetation ; 2 = Aquatic vegetation ; 3 = Swamps and marshes ; 4 = Cultivated fields ; 5 = Atlantic Ocean ; 6 = Hydrographic network*

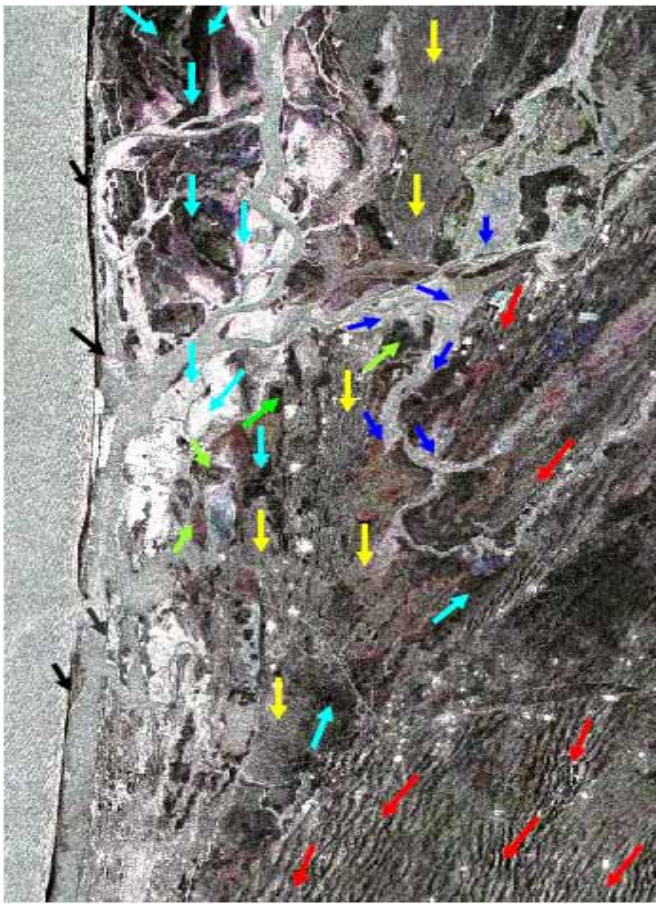


Figure 5 : Unités géomorphologiques du delta du fleuve Sénégal, interprétées d'après l'extrait de l'image RSO du 1er janvier 2005. DA : dunes actuelles, DSA : dunes subactuelles ; DR : dunes rouges ; CL : cordons littoraux ou dunes jaunes ; TN : terrasses nouakchottiennes ; VA : vasières actuelle et ancienne ; C : cuvettes. *Geomorphologic units of the Senegal River delta interpreted from a subset of January 1, 2005 SAR image. DA: recent dunes, DSA: sub-recent dunes ; DR: red dunes ; CL: littoral bars or yellow dunes ; TN: noukchottian terraces ; VA: recent and ancient mud terrains ; C : depressions.*

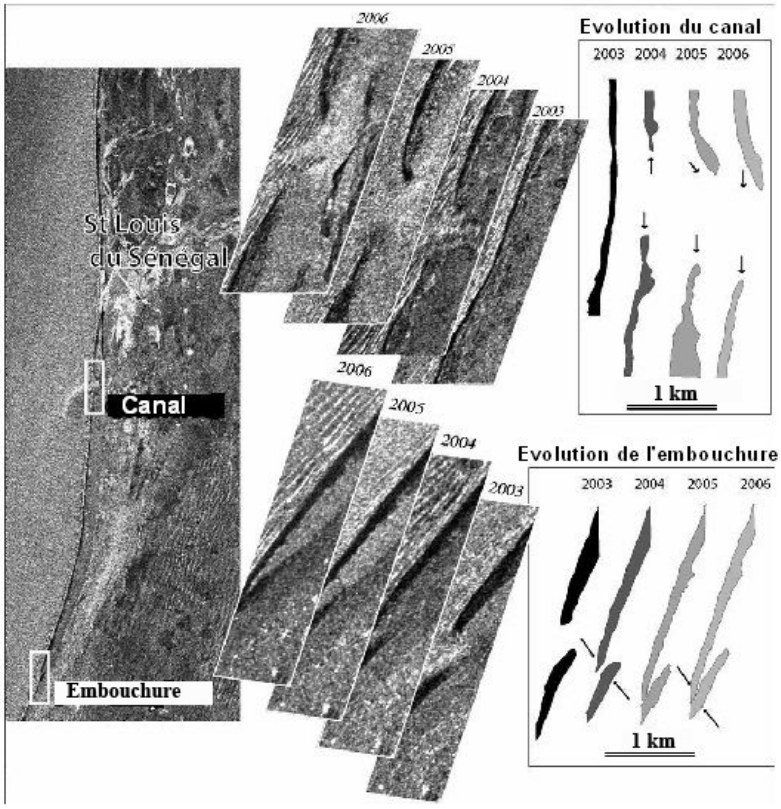


Figure 6 : Extraits d'images montrant l'évolution du canal et de l'embouchure. Noter l'élargissement du canal et la fermeture totale de l'ancienne embouchure par apports de sédiments de la dérive littorale. *Images subsets showing artificial breach and river mouth evolution. Note artificial breach widening and total closure of ancient river mouth due to sediment input by littoral drift.*

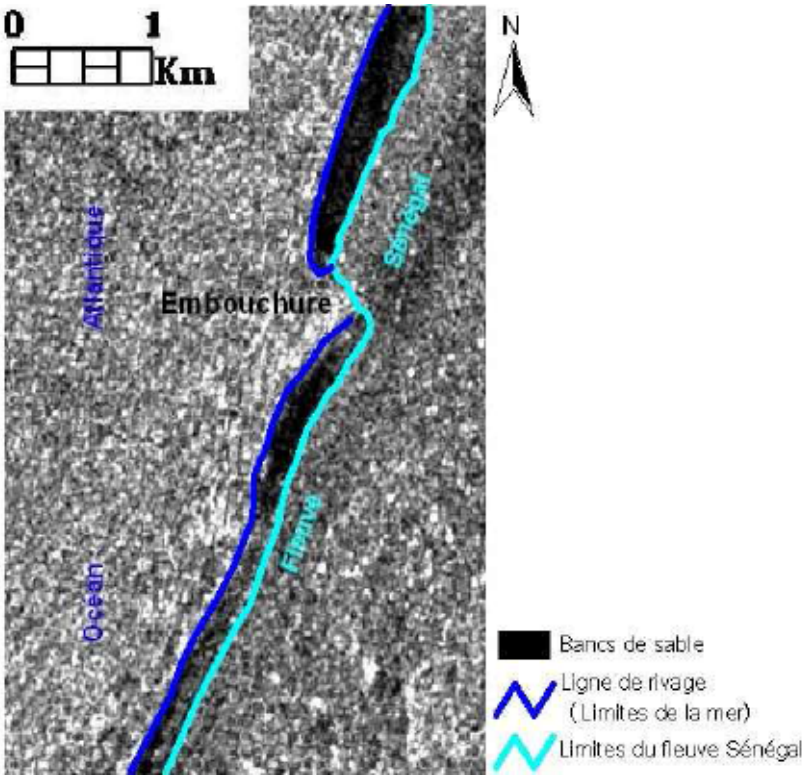


Figure 7 : Extrait d'image RSO montrant les bancs de sable et la ligne de rivage. *SAR scene subset showing sand banks and shoreline*

4.3. Évolution de la zone littorale

Les transformations de la ligne de rivage et les phénomènes de migration des bancs sableux au niveau du canal de délestage qui recoupe la Langue de Barbarie ont pu être mis en évidence et quantifiés grâce à la superposition des images RSO prises entre 2003 et 2006. C'est ainsi qu'on constate un recul de la ligne de rivage compris entre 40 et 290 m au niveau du canal de délestage pour cette période, entre 2003 et 2006 (soit un taux d'érosion de 13 à 97 m par an) et entre 40 et 90 m (soit un taux d'érosion de 13 à 30 m par an) au niveau de la partie centrale de l'île Babagueye (figure 8). Cette même île a connu au cours de la période 2003-2006 une accrétion d'environ 40 à 120 m (soit un taux d'accrétion de 13 à 40 m par an) à ses extrémités. Ces taux de recul et d'accrétion (en m/an) du rivage ont été mesurés perpendiculairement à la côte à l'aide des outils de mesure d'ArcView 3.2.

La migration des bancs de sable au niveau de l'embouchure du fleuve Sénégal peut aussi être évaluée sur les images radar de la série multidate prises entre 2003 et 2006. La largeur de l'ancien chenal d'embouchure est passée de 500 m en 2003, à 320 m en 2004 et à 5 m en 2005 avant qu'il ne se ferme presque complètement en 2006. Ceci représente une vitesse de fermeture de l'ordre de 150 m par an (figures 6 et 9).

De la même manière, la migration des bancs de sable au niveau du canal de délestage a pu être évaluée à partir de la même série d'images. Les mesures montrent que la largeur du canal est passée de 3 m, à son ouverture en 2003, à 750 m, en 2004, 1 200 m, en 2005, avant d'atteindre environ 1 500 m, en 2006, ce qui représente une vitesse d'ouverture d'environ 500 m par an (figures 6 et 10). Le Service Régional de l'Hydraulique de Saint-Louis (information non publiée), à partir des levés GPS, avait estimé à 200, 329 et 800-900 m les largeurs respectives du canal de délestage le 6 octobre 2003, 23 octobre 2003 et 18 juin 2005.

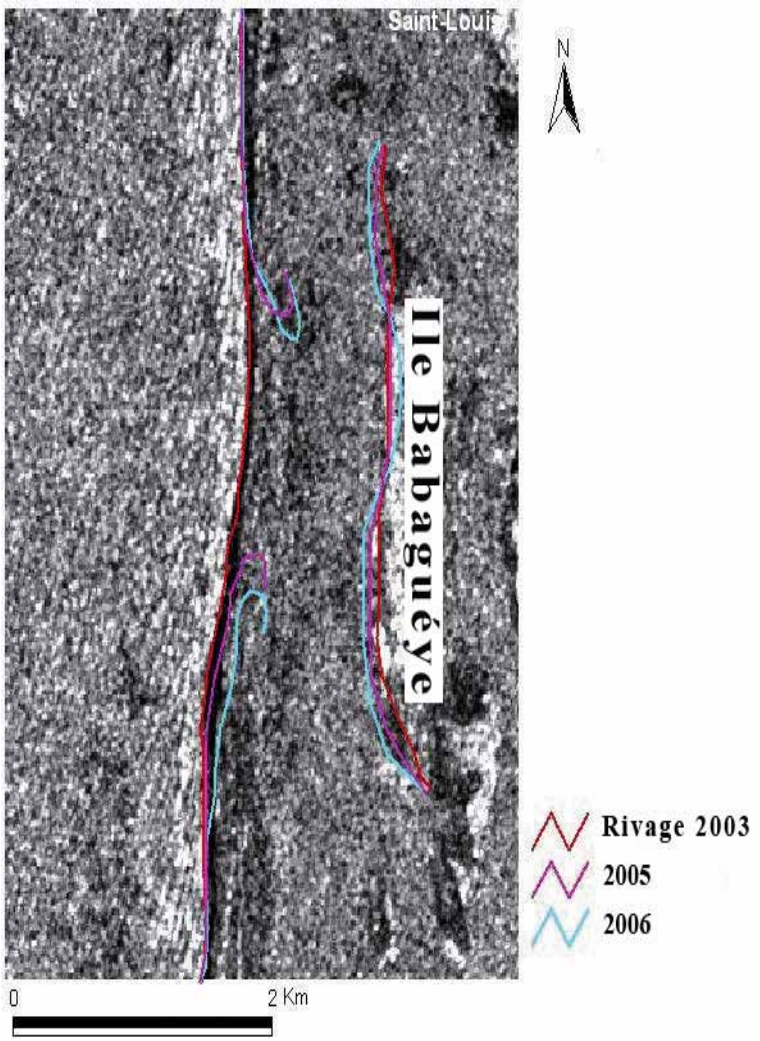


Figure 8: Évolution de la ligne de rivage au niveau du canal de délestage et sur l'île Babagueye entre 2003 et 2006. Image de fond : extrait d'une image RSO du 21 juin 2003. *Coastline evolution at the level of the artificial breach and on Babagueye Island, from 2003 to 2006. Background image : Subset of the June 21, 2003 SAR image.*

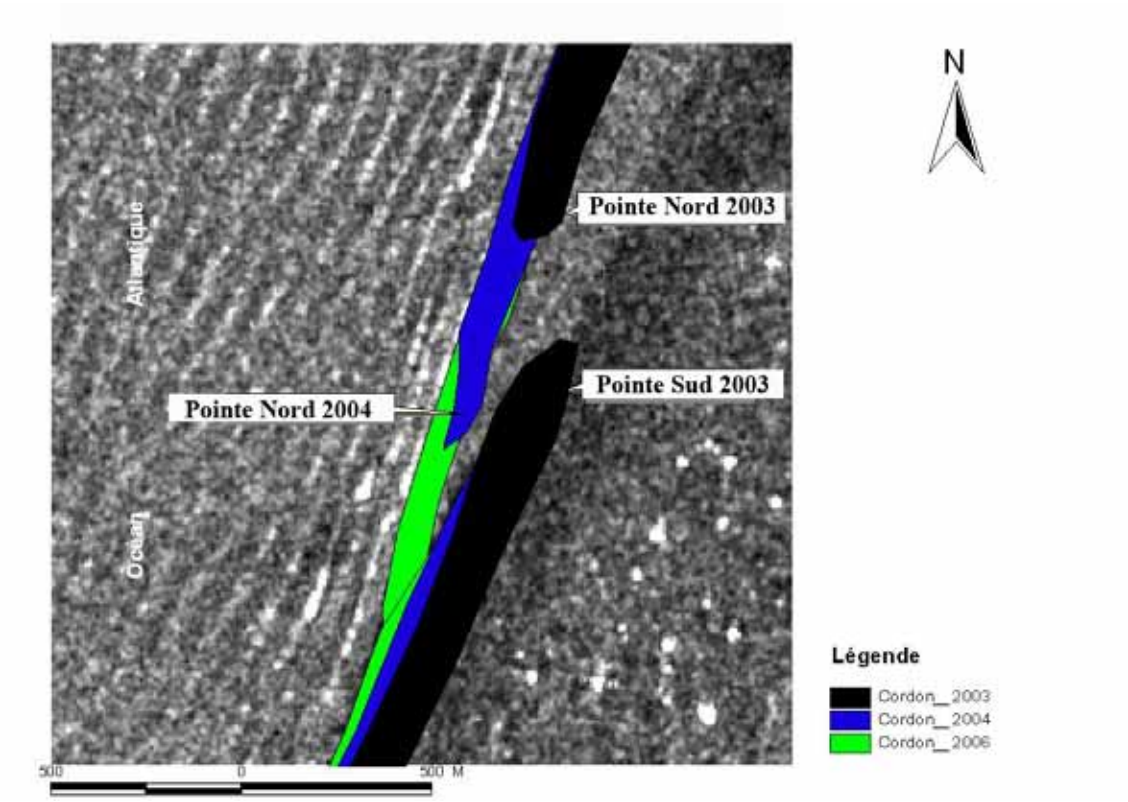


Figure 9 : Évolution des extrémités nord et sud de l'embouchure du fleuve Sénégal entre 2003 et 2006. Image de fond : extrait d'une image RSO du 8 mars 2003. *Evolution of proximal and distal ends of the Senegal River mouth from 2003 to 2006. Background image : Subset of the March 8, 2003 SAR image.*

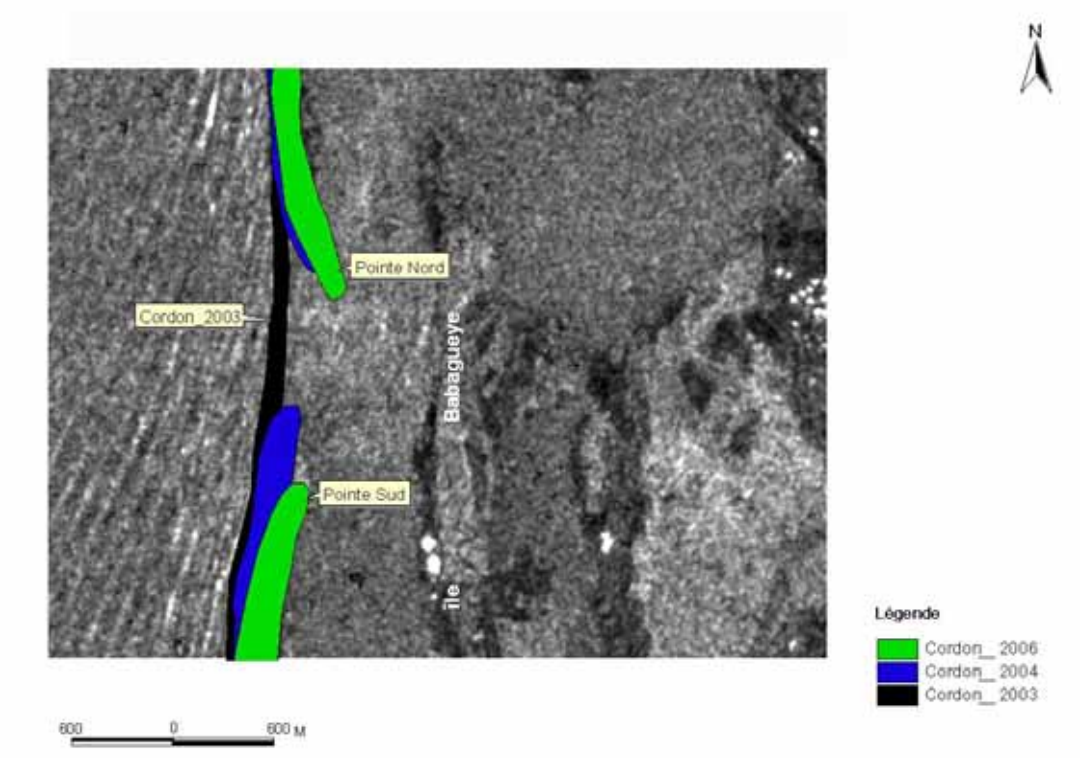


Figure 10 : Évolution des extrémités nord et sud du canal de délestage entre 2003 et 2005. Image de fond : extrait d'une image RSO du 8 mars 2003. *Evolution of the proximal and distal ends of the artificial breach from 2003 to 2006. Background image : Subset of the March 8, 2003 SAR image.*

5. DISCUSSION

5.1. Évolution de la ligne de rivage

Les mesures effectuées dans la zone du canal de délestage montrent une vitesse de recul de la ligne de rivage de 13 à 97 m par année qui diffère de façon significative de celles obtenues par Guilcher et Nicolas (1954) pour la période de 1856 à 1922, Sy (1981) et Sall (1982) pour la période de 1972 à 1978, Kane (1985) et Niang-Diop (1995) pour la période de 1954 à 1989. Ces auteurs ont, à l'aide de comparaisons de profils de plage et de photographies aériennes, évalué l'évolution de la ligne de rivage dans la partie habitée de la Langue de Barbarie, au droit de Saint-Louis (quartiers de Goxxu Mbacc, Ndar Tout et Guet Ndar). Le taux de recul ainsi obtenu variait entre 1 et 2 m par année le long du littoral de Saint-Louis. La grande différence entre les taux d'évolution mesurés par ces auteurs et les nôtres ne peut être attribuée simplement aux différentes méthodologies utilisées (en particulier, la ligne de rivage était déterminée par les niveaux de marée haute en général) mais plutôt à la nature des processus en jeu. En effet, les reculs (1 à 2 m par an) observés et mesurés par les auteurs précédents relèvent de l'évolution naturelle et lente d'un rivage soumis notamment à une lente hausse du niveau marin relatif. Par contre, l'ouverture du canal de délestage a créé un déséquilibre important et brutal dans la zone littorale, qui a répondu en reculant d'une manière très rapide. Le même type de réponse avait été observé dans l'estuaire du Saloum, au centre-ouest du Sénégal, à la suite de l'ouverture (naturelle) d'une brèche dans la flèche de Sangomar, en février 1987, où des taux d'érosion allant jusqu'à 130 m par an avaient été mesurés entre 1981 et 1989 au moyen de photographies aériennes et d'images optiques (Diaw, 1997). L'érosion a aussi affecté les bordures nord et sud du canal de délestage, qui n'a cessé de s'élargir, mais elle a également affecté la partie centrale de l'île Babagueye, qui s'est brutalement trouvée attaquée par les vagues alors qu'auparavant elle en était protégée. Bien que ce processus d'érosion rapide devrait, à terme, se ralentir quand un nouvel état d'équilibre aura été atteint, le sort de l'île Babagueye semble plus préoccupant, compte tenu de sa faible largeur et de son exposition directe à l'assaut des vagues.

5.2. Évolution de l'embouchure du fleuve Sénégal

L'étude, à partir de la série d'images radar (figures 6 et 10), de l'évolution de la largeur du canal de délestage creusé à environ 7 km au sud de la ville, montre qu'elle est passée de 3 m, en 2003, à 750 m, en 2004, pour ensuite atteindre respectivement 1 200 m et 1 500 m en 2005 et 2006. Ceci représente une vitesse d'ouverture moyenne de 500 m par an. Ces résultats ne sont pas très éloignés de ceux obtenus par GPS par le Service Régional de l'Hydraulique de Saint-Louis qui avait estimé à 200, 329 et 800-900 m les largeurs respectives du canal le 6 octobre 2003, le 23 octobre 2003 et 18 juin 2005.

L'ouverture, puis l'élargissement du canal de délestage, se sont accompagnés de la fermeture progressive de l'ancienne embouchure du fleuve, à 30 km au sud de la ville. Une telle évolution conforte l'hypothèse avancée par Delpit (1908), selon laquelle, au niveau de la Langue de Barbarie, la coexistence de deux embouchures présente toujours un caractère éphémère en raison du décalage des courants, décalage préjudiciable au nettoyage des fonds. En effet, une fois qu'une nouvelle embouchure s'ouvre au nord, elle est empruntée par les courants de jusant alors que l'ancienne embouchure, située plus au sud, tend à être empruntée par le flot et finit par se colmater.

6. CONCLUSION

Le traitement et l'analyse de la série de données multidates radar du littoral de Saint-Louis apportent une nouvelle vision de l'évolution côtière de la Langue de Barbarie et de l'estuaire du fleuve Sénégal, à la suite de l'ouverture d'un canal de délestage, à 7 km au sud de la ville de Saint-Louis. L'érosion observée au niveau du canal de délestage est à l'origine de son élargissement et du recul rapide de la ligne de rivage, alors que l'accrétion est responsable de l'ensablement progressif de l'ancien chenal d'embouchure et de sa fermeture définitive. Ces phénomènes extrêmement rapides, qui sont conformes aux observations de terrain, représentent des processus de rééquilibrage à la suite d'une modification brutale du littoral (ouverture du canal de délestage). Des phénomènes de même ampleur ont été observés dans l'estuaire du Saloum, au niveau de la brèche creusée dans la flèche de Sangomar. Ils sont différents des processus naturels d'érosion côtière qui ont été mis en évidence par d'autres auteurs le long du littoral de Saint-Louis et qui relèvent de la réponse lente des littoraux notamment à la hausse du niveau marin relatif. Cependant, les résultats obtenus à l'aide de l'imagerie RSO sont d'une plus grande précision. Les images radar ont ainsi permis d'évaluer la vitesse de déplacement de la ligne de rivage le long du littoral, les phénomènes d'érosion autour et en face du canal (îles Babagueye) ainsi que les phénomènes d'accrétion autour de l'ancienne embouchure qui ont abouti à sa fermeture. Une telle méthodologie semble bien adaptée au suivi de processus rapides d'évolution du littoral. Par ailleurs, les informations ainsi générées peuvent contribuer à mettre à jour rapidement les cartes marines du littoral de la Langue de Barbarie.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs vifs remerciements au Ministère français des affaires étrangères pour son appui dans le cadre du projet CORUS/GESCAN 02317047, ainsi qu'à l'Agence universitaire de la Francophonie qui a financé l'action de recherche partagée en réseau ARR N°P2.2015RR405. L'Agence spatiale européenne est également remerciée pour la

mise à disposition des images radar dans le cadre du projet TIGER/TREES. Enfin, le Centre AGRHYMET de Niamey est vivement remercié pour l'accueil et l'important appui logistique et scientifique.

Références

Bâ, K. (2004) Étude de l'évolution de la Langue de Barbarie et propositions de fixation de l'embouchure du fleuve Sénégal. Mémoire de DEA, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 93 p.

Cantou, J.-P. et Tonon, M. (1997) Cartographie radar de la Guyane : vers une chaîne de production opérationnelle des spatiocartes, Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, n° 148, p. 36-43.

Chaumon, M. (2005) Urbanisme et aménagement urbain, impact sur les inondations de Saint-Louis. Mémoire de DESS, Université de Paris 1, 127 p.

COSEC/SOGREA (Conseil sénégalais des chargeurs/Société grenobloise d'étude et d'application hydraulique) (2002) Étude de l'accessibilité et de l'implantation du port de Saint-Louis. Reconnaissances bathymétriques de novembre 2001, Rapport de phase II de l'étude de l'accès et de l'implantation du port de Saint-Louis. 9 p. et 4 cartes bathymétriques.

Delpit, M.J. (1908) Essai d'amélioration de l'embouchure du Sénégal. Construction d'un épi en mer. Rapport sur l'amélioration de la barre du Sénégal 1908-1910. Archives du Sénégal, Dakar, dossier P244, pièces 4, 5, 7 et 9.

Dia, A.M., Wade, S., Deroin, J.-P., Kouamé, J., Rudant, J.-P. (2006) Apport des données SPOT et Landsat au suivi des inondations dans l'estuaire du fleuve Sénégal. Photo-interprétation, vol. 42, n° 4, p. 35-46.

Diaw, A.T. (1997) Évolution des milieux littoraux du Sénégal. Géomorphologie et télédétection. Thèse de doctorat, Université de Paris I, 270 p.

Diop, I. (2004) Canal de délestage de la crue de 2003 : Impacts et perspectives. Communication devant l'Académie des Sciences du Sénégal en Séance Spéciale : Inondations et aménagements, le cas de Saint Louis. Hôtel Le Méridien Président, Dakar, 12 p.

Guilcher, A. et Nicolas, J.-P. (1954) Observation sur la Langue de Barbarie et les bras du Sénégal aux environs de Saint-Louis. Bulletin d'information du Centre international d'exploitation des océans, Paris, vol. 6, p. 227-242.

Kane, A. (1985) Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine dans la vallée du fleuve. Contribution à l'hydrologie fluviatile et à la dynamique estuarienne en milieu sahélien. Thèse de doctorat, Université de Nancy II, Nancy, 230 p.

Michel, P. (1969) Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, 3 tomes, 1169 p.

Niang-Diop, I. (1995) L'érosion côtière sur la petite côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Passé, Présent, Futur. Thèse de doctorat, Université d'Angers, Angers, tome 1, 317 p.

Pinson-Mouillot, J. (1980) Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (Nord de la Presqu'île du Cap Vert). Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, n° 1554, 106 p.

Rudant J.-P., Deroin, J.-P. et Baltzer, F. (1996) Apport des images radar satellitaires ERS-1 et JERS-1 dans le domaine de la cartographie générale et thématique en contexte tropical humide. Bulletin de la 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.

Sall, M (1982) Dynamique et morphogenèse actuelle au Sénégal Occidental. Thèse de doctorat d'état, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 604 p.

Sall M. (2006) Crue et élévation du niveau marin à Saint-Louis du Sénégal : impacts potentiels et mesures d'adaptation. Thèse de doctorat, Université du Maine, 332 p.

Scharroo, R. and Visser, P. (1998) Precise orbit determination and gravity field improvement for ERS satellites. Journal of Geophysical Research, vol. 103, n° C4, p. 8113-8127.

Soumaré, A. (1996) Étude comparative de l'évolution géomorphologique des bas estuaires du Sénégal et du Saloum : approche par les données de terrain et la télédétection. Thèse de doctorat, Université de Dakar, Dakar, 265 p.

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.

Sy, A. (1981) Étude géomorphologique des flèches sableuses du littoral sénégalais : Langue de Barbarie (Nord Sénégal), Pointe de Sangomar (Saloum), Presqu'île aux oiseaux (Casamance). Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Dakar, 103 p.

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

Trébossen, 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 de la Société française de photogrammétrie et télédétection, n° 161, p. 29-39.

Trébossen, H., Paganini, M., Rudant, J.P., Rosich, B. (2007) ASAR images geometric capabilities for coastal mapping ; framework of ESA DUE Coastchart project ; examples of Coastal zones of Nigeria and Gabon, ENVISAT Symposium, Montreux, 23-27 avril 2007.

Wade, S. et Rudant, J.-P. (2001) CORUS (Coopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique), GESCAN (Gestion des catastrophes naturelles par télédétection et SIG : application à l'étude hydrologique du fleuve Sénégal et à la gestion des risques d'inondation de la ville de Saint-Louis. Laboratoire de télédétection appliquée, Institut des sciences de la Terre, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 94 p.

Wade, S., Onana, V.P., Rudant, J.-P., Gaffuri, J., Dia, A.M., Kouamé, J. et Ngah-Asse Etouna, J. (2004) Application de la Télédétection et des SIG à la gestion des inondations de la ville de Saint Louis au Sénégal : résultats préliminaires. Communication aux X^{e} Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie, 24-29 mai 2004, Ottawa (Canada).