

Apport de l'Imagerie Spatiale Optique et Radar pour la Cartographie des Bancs de Vase en Guyane Française

N. Baghdadi . A. David . C. Oliveros

BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 3 avenue C. Guillemin
B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France
Tel : 02 38 64 32 02 - Fax: 02 38 64 36 89
E-mail: n.baghdadi@brgm.fr

N. Gratiot

Institut de Recherche pour le Développement,
165 Route de Montabo, 97323 Cayenne, Guyane

Résumé : Le déplacement des bancs de vase en Guyane a un impact important sur l'économie régionale. Aussi, la recherche d'outils permettant la cartographie des bancs présente un grand intérêt. Ceci se traduit par la détection en mer des bancs de vase qui viennent perturber l'accès aux chenaux (ports) ce qui constitue un gêne pour la navigation. Des images satellitaires radar et optique, acquises sur la Guyane française entre 2001 et 2003, ont été analysées pour examiner leurs apports à la détection des bancs de vase. Des mesures bathymétriques ont également été effectuées à des dates proches d'acquisitions satellitaires. La relation entre bathymétrie et information satellitaire a également été étudiée. Les résultats montrent que les bancs de vase émergés ou immergés sous une faible couche d'eau (quelques dizaines de centimètres au maximum) sont facilement détectables sur les images. Les images optiques et radar ont un apport comparable pour la cartographie des bancs. Les images radar à faible angle d'incidence permettent une meilleure détection des bancs de vase comparativement à celles à fort angle d'incidence. Une faible dépendance est observée entre le signal radar et la profondeur de l'eau si cette dernière est inférieure à environ 30 cm. Au-delà de ce seuil, le signal radar devient indépendant de la profondeur de l'eau. Cependant, des relations bien plus nettes ont été obtenues pour les faibles profondeurs (<30 cm) entre la radiométrie optique et la hauteur d'eau dans les bandes du MIR (Moyen InfraRouge) et du PIR (Proche InfraRouge). Cette étude a également mis en évidence l'évolution rapide du trait de côte en Guyane et la possibilité de suivre cette évolution grâce aux images radar.

Mots-clés : Bancs de vase, Imagerie Satellitaire radar et optique, Bathymétrie, Guyane Française.

Abstract : Potential of optical and radar satellite imagery for mudbank monitoring in French Guiana. The constant migration of mudbanks in French Guiana has an enormous impact on national economy, which has led to a great local interest in finding tools that can be used for mudbank monitoring. This involves the ability to detect submarine mudbanks that interfere with port access and impede navigation. Radar and optical satellite images of French Guiana, acquired between 2001 and 2003, have been analysed and compared so as to assess their potential in mudbank monitoring. Bathymetric data were also recorded at times similar to those of satellite acquisition, which enabled a comparative study between bathymetry and satellite data. The mudbanks that were either emerged or under a shallow layer of water (a few tens of centimetres at the most) are easily detectable on the images, bath radar and optical images showing a similar degree of potential for mudbank monitoring. The mudbanks are more easily detected on low-incidence radar images than on high-incidence ones. A slight dependence is noted between the radar signal and water depth where the latter is less than some 30 cm. For deeper waters, however, the radar signal becomes independent of water depth. Much clearer trends are observed for shallower waters (< 30 cm) between the optical images and water depth using MIR (Mid InfraRed) and NIR (Near InfraRed) bands. The results also revealed the rapid coastline changes occurring in French Guiana and the possibility of monitoring those using radar images.

Keywords : Mudbank, Optical and radar satellite imagery, Bathymetry, French Guiana.

1. Introduction

Par sa situation géographique, au nord-ouest de l'embouchure de l'Amazone (Cap Orange), et compte tenu de la circulation océanique côtière, le littoral guyanais présente de fortes évolutions morphologiques avec des phases alternatives d'accrétion et d'érosion en relation avec le déplacement des bancs de vase. La dynamique sédimentaire de la côte guyanaise est gouvernée par :

- Le fleuve Amazone qui constitue plus de 90% du stock sédimentaire transporté le long de la côte des Guyanes. Plus d'un milliard de tonnes de sédiments sont drainés annuellement sur le bassin Amazonien et rejetés à la mer [Eisma et al., 1991]. La grande majorité de ces matériaux se dépose immédiatement dans l'embouchure du fleuve mais 15 à 20% vient participer à la dynamique sédimentaire de la côte des Guyanes [Wells et Coleman, 1981]. Le transport s'effectue ensuite pour part égale sous forme de bancs de vase (environ 10^6 tonnes/an) et sous forme de suspension diluée (1 à $1.5 \cdot 10^6$ tonnes/an).
- Le Courant Nord Brésilien qui participe fortement au transport des sédiments en suspension. De direction et de sens sud-est – nord-ouest, il traverse le panache turbide à l'embouchure de l'Amazone et se charge de matières en suspension (MES). Il transporte ensuite ces MES jusque sur la côte guyanaise, où il est relayé par le Courant des Guyanes, de même direction et même sens.
- La houle perpendiculaire au Courant des Guyanes qui prend une large part au système d'accumulations vaseuses et de transport en bancs de vase. Elle crée les conditions nécessaires pour la mobilisation « en masse » des sédiments de fond. Dans une moindre mesure, le Courant des Guyanes joue également un rôle: les bancs sont attaqués et s'érodent du côté sud-est. En revanche, le côté nord-ouest des bancs reste en eaux calmes, ce qui permet une rapide accrétion des sédiments nouvellement arrachés aux bancs [Froidefond et al., 1988].
- Dans une moindre mesure, les courants de marée contribuent au modelage du littoral. La marée présente un signal semi-diurne avec un niveau moyen des basses mers d'environ 1.2 m et un niveau moyen des pleines mers d'environ 3 m. Le marnage (différence de hauteur de la marée entre une pleine mer et une basse mer successives) est de l'ordre de 0.7 mètres en mortes-eaux et atteint 2.5 mètres en vives-eaux. Dans ce contexte mésotidal, l'extension cross-shore de la zone intertidale reste cependant importante et atteint

fréquemment deux à trois kilomètres. Ceci résulte du fait que la pente des zones intertidales des bancs de vase est très faible, de l'ordre de 1/1000ème. Ainsi, une petite diminution de la hauteur d'eau peut donc découvrir de grandes surfaces de banc.

Le déplacement des bancs modifie considérablement la morphologie du littoral guyanais. Le passage successifs de bancs s'accompagne d'avancées et de reculs du trait de côte sur plusieurs centaines de mètres [Allard, 1997 ; Trebossen et al., 2001]. Sous l'action du courant et des houles, Froidefond et al., [1988] estimaient les vitesses de progression des bancs de 320 m/an à 1200 m/an. Les conditions environnementales jouent un rôle important dans la formation et la migration des bancs de vase. Les fortes houles générées de janvier à mai, pendant les saisons des pluies, impliquent une phase active et rapide de migration des bancs. Le forçage des houles se traduit souvent par une accumulation de vase fluide en avant du banc pour former des « lacs de vase » [Baghdadi et al., 2004]. Les « lacs de vase » sont caractérisés par une surface très lisse du fait de la très grande viscosité de la crème de vase qui les constituent. Ils peuvent se désolidariser du banc et être transportés sur plusieurs kilomètres tout en conservant leur identité. La diminution du forçage océanique (courant et houle) de juin à décembre, pendant la saison sèche, favorise la structuration et la consolidation de la partie intertidale des bancs. Les bancs peuvent s'étendre sur 20 à 35 km le long des côtes et se prolonger vers le large jusqu'aux isobathes – 15m, soit à une distance d'environ 20 km de la côte. Ils sont constitués d'entités morphologiques hétérogènes, à savoir : la jeune mangrove côtière ; la zone intertidale constituée de vase nue émergée à marée basse et la zone subtidale, toujours immergée. Le trait de côte est défini par la ligne frontière entre la mangrove mature et la frange océanique.

La zone intertidale présente différents niveaux de structuration. Sa partie jointive à la côte est constituée d'une accumulation de sédiments plastiques permettant la création de modelés pérennes, notamment sous forme de chenaux de marée et de barres côtières. Elle se caractérise de plus par une colonisation algales puis végétale. Cette partie qui reste en place durant la migration du banc est dénommée slikke (zone de vase nue soumise au balancement des marées). La frange extérieure de la zone intertidale forme une ceinture de vase nue faiblement consolidée et donc encore mobilisable. La nature des parties subtidales reste mal connue.

Elle est principalement identifiable par son action d'amortissement de la houle incidente.

Les zones d'interbanc sont, quant à elles, caractérisées par le creusement en dents de scie de la ligne de rivage. L'absence de vase meuble conduit à un amortissement moindre de la houle qui se propage jusqu'à la côte. Son déferlement contribue au recul de la ligne de rivage avec formation de micro falaises. Les arbres situés dans la frange d'érosion sont déracinés. Cette frange présente un talus d'érosion taillé dans la vase consolidée et en contact avec la mer.

Deux entités morphologiques similaires aux slikkes peuvent être observées en zone d'interbanc : les flèches vaseuses et les platiers vaseux. Les flèches vaseuses résultent du piégeage des sédiments en transit à proximité des estuaires. Du fait de la direction de la dérive littorale sur le plateau des Guyanes, ces flèches se forment généralement sur la rive droite des embouchures. Les platiers vaseux résultent quant à eux du piégeage des sédiments par des singularités du trait de côte telles que les anses et les caps.

Les phases successives de bancs de vase et d'interbancs entraînent des évolutions rapides du paysage littoral (trait de côte et bathymétrie de petits fonds) et constituent des obstacles à la navigation. La rapidité des évolutions provoque de réels problèmes pour la gestion de la zone côtière. Pêche, transport maritime, et tourisme doivent s'adapter en continu à ces évolutions. Toutefois, ce sont surtout les implications sur les activités portuaires qui sensibilisent le plus les autorités territoriales compte tenu de leur fort impact économique. En effet l'envasement des chenaux d'accès des ports de Cayenne (capitale économique) et Kourou (centre spatial) implique l'intervention fréquentes des dragues afin d'assurer une navigation normale des bateaux de commerce. Ces interventions quotidiennes sont très onéreuses. La connaissance de l'état d'envasement des chenaux de navigation constitue une préoccupation majeure qui est satisfaite aujourd'hui par un suivi bathymétrique par écho sondeur réalisé à intervalle régulier. Ces opérations lourdes à mettre en œuvre, seraient facilitées et la planification optimisée par une localisation préalable et rapide des bancs. De la même façon, il peut être fondamental, en particulier en période d'envasement et d'érosion des côtes, de pouvoir suivre l'évolution des bancs de vase et de réaliser leur cartographie sur toute la région concernée. La mise en place d'un suivi via les images satellitaires faciliterait la tâche des

gestionnaires et constituerait un outil efficace d'aide à la décision. La télédétection spatiale permet d'acquérir des données d'observation de la terre de façon répétitive, programmable et relativement peu onéreuse.

Sur la zone d'étude, située entre la Pointe de Béhague et Kourou, on comptait en mars 2003 quatre bancs de vase de différentes tailles et un lac de vase (cf. Figure 1).



Fig. 1 Bancs repérés en mars 2003 entre le fleuve Oyapok et Kourou.

Compte tenu du climat équatorial humide qui règne dans cette région, l'utilisation des images optiques est problématique à cause de la présence très fréquente de nuages. Ainsi, il est en général difficile d'observer les bancs par imagerie satellitaire optique pendant la saison des pluies, alors que le forçage océanique est le plus fort. Les capteurs radar permettent de s'affranchir des contraintes météorologiques, ce qui présente un grand avantage lorsque les observations sont impératives quelle que soit la saison. Concernant la partie immergée des bancs de vase, les images radar qui sont très sensibles à la rugosité de surface, sont susceptibles de traduire leur présence considérant les deux hypothèses suivantes :

- L'interaction du fond vaseux avec les ondes de surface océaniques (houle formée, mer du vent) est susceptible de modifier la rugosité de surface et par conséquent, la rétrodiffusion du signal radar puisque cette dernière augmente avec la rugosité [Baghdadi et al., 2002 ; Rakotoarivony et al., 1996]. Bien que les lois physiques régissant l'interaction des vagues avec les bancs de vases restent mal connues, l'influence des fonds sera d'autant plus marquée que la profondeur d'eau sera faible vis-à-vis de la longueur d'onde des houles et de leur amplitude. Selon le degré de viscosité et d'élasticité du sédiment de fond,

l'interaction de la houle avec le banc peut se traduire par un amortissement complet des houles ou par leur déferlement. Ces deux phénomènes modifient l'état de surface de la mer, d'où une signature différente dans les images radar. Le premier phénomène (amortissement) rend la surface de l'eau lisse, ce qui se traduit par un coefficient de rétrodiffusion faible. Le second phénomène (déferlement) est détectable sur les images sous la forme d'un « front » qui marque cette discontinuité [Vogelzang et al., 1997].

- La très forte charge solide de l'eau (vases fluides) induite par l'interaction de la partie sommitale du banc avec la houle et le courant tend à atténuer les clapots par modification de la capillarité, ce qui pourrait se traduire par une rétrodiffusion plus faible.

L'objectif principal de cette étude est de tester le potentiel des images RADARSAT, en relation avec les images optiques SPOT et LANDSAT, pour la détection et la cartographie des bancs de vase. Des images acquises en 2002 et 2003 ont été étudiées pour des paramètres d'acquisitions et des conditions de marée variables. Les images radar ont été comparées aux images optiques et aux données bathymétriques. L'étude permet de montrer l'apport qu'il est actuellement légitime d'attendre des outils de télédétection au niveau de la cartographie des bancs de vase.

2. Description des données utilisées

2.1 Images satellitaires

Des images radar (RADARSAT) et optique (SPOT et LANDSAT) ont été acquises entre 2001 et 2003 pour étudier la potentialité des images satellitaires quant à la détection des bancs de vase et leur suivi. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques des images.

Quelques pré-traitements ont été réalisés sur les images afin de les rendre exploitables pour l'analyse thématique. Dans un premier temps, les images radar ont été calibrées radiométriquement, en transformant l'amplitude du signal (compte numérique) en coefficient de rétrodiffusion (σ_0). Le géocodage des images radar qui consiste à corriger les déformations géométriques dues aux reliefs n'a pas été réalisé. En effet, ce traitement lourd (nécessitant un Modèle Numérique de Terrain) peut être évité dans les régions à morphologie plane où les distorsions sont faibles, ce qui est le cas dans la zone côtière.

Ensuite, les images radar et optique ont été géoréférencées dans le système géodésique

Guyanaïsi CSG67 à l'aide des cartes topographiques de l'IGN au 1 : 25.000 disponibles sur les régions côtières.

2.2 Données terrain

Pour étudier la relation entre la hauteur d'eau et l'information satellitaire, des points de bathymétrie ont été relevés durant la campagne de terrain de mars-avril 2003 (cf. Tableau 2). Ces levés ont été réalisés à des dates proches de l'acquisition des images SPOT du 16/03/2003 et RADARSAT du 25/03/2003.

Les coordonnées planimétriques des points de bathymétrie ont été levés par GPS portatif avec une précision d'environ 15 m. Ces levés sont réalisés dans les systèmes WGS84 et CSG67.

Tableau 2. Description des données bathymétriques

Date	Sites	Nbre de points	Autres mesures
31-03-03	Kourou	76	Concentrations en MES Observations terrain
01-04-03	Cayenne Mahury	68	
03-04-03	Kaw	120	

Les mesures de bathymétrie, réalisées dans la zone intertidale, ont été obtenues à partir d'une embarcation légère par levé au plomb de sonde et par échosondeur 200kHz. La comparaison des deux méthodes de mesures permet de caractériser l'épaisseur de crème de vase. En effet, l'interface eau chargée-crème de vase (appelée lutocline) est suffisamment marquée pour produire l'écho principal du signal acoustique émis à 200kHz tandis que la densité du plomb de sonde (calibrée à 1.27) lui permet de traverser la couche de crème de vase jusqu'à des fonds plus consolidés.

Les mesures bathymétriques vont permettre d'une part, de confirmer ou d'infirmer les conclusions issues de la photo-interprétation et d'autre part, de déterminer s'il existe une relation entre les réponses satellitaires (optique et radar) et la profondeur des bancs. L'incertitude sur la mesure bathymétrique résulte de celle issue des données des marégraphes et de la mesure de profondeur in situ. Elle est estimée à une vingtaine de centimètres.

3. Analyse des images radar

3.1 Interprétation

La photo-interprétation des images radar a été

réalisée conjointement avec les observations issues de nos campagnes de terrain.

Différents critères ont permis de réaliser l'interprétation des images, notamment la radiométrie (teinte) et la texture des objets (la forme) ainsi que leur position géographique.

L'interprétation des images radar est réalisée dans un premier temps de manière strictement visuelle, en se basant sur une bonne connaissance du terrain. Nous utilisons les outils classiques de rehaussement du contraste, sur l'ensemble de l'image ou sur des régions d'intérêt.

Nous avons ainsi pu déterminer plusieurs classes d'objets identifiables sur l'imagerie radar : les lacs de vase, les barres vaseuses, les parties émergées et faiblement immergées des bancs de vase (vasières), et les micro-reliefs. Tous ces objets peuvent être observés sur la plupart des images radar disponibles. L'image RADARSAT du 14 novembre 2002 a été choisie pour sa qualité pour présenter notre interprétation visuelle des images radar (cf. Figure 2).

L'eau du large et la houle

Le signal radar rétrodiffusé par l'eau est le résultat de la diffusion de Bragg. Les conditions de vent et les courants modulent la diffusion. En certains endroits, des éléments océaniques sont visibles là où la diffusion de Bragg est très variable. On peut constater des variations du ton de l'eau comme c'est le cas dans le fleuve Approuague par exemple. La zone de faible radiométrie peut correspondre à une zone de faible vent. De même, on peut observer la houle au large (cf. Figure 2). Cette observation nette est rare sur les images radar. En effet, la houle en Guyane est en général de direction nord-est, alors que la visée de RADARSAT est orientée à 80° ou 280° (en orbite ascendante ou descendante). Dans les deux cas, la configuration n'est pas optimale pour observer la houle.

La houle orientée d'environ 120° est alors observée sous un angle faible, entre 20° et 40° respectivement en mode descendant et ascendant. On constate également que la houle n'est visible qu'au large, là où elle a une forte amplitude.

Parties faiblement immergées des bancs

Une partie des bancs a une radiométrie radar très faible, et apparaît en noir sur les images radar. Il s'agit de la partie faiblement immergée des bancs de vase (Figure 3). Cette faible radiométrie (de -21dB à -25dB) est due à la réflexion quasi spéculaire du signal radar sur la surface lisse de l'eau.

L'observation de terrain reportée sur la série de photos de la Figure 4a montre que lorsque la profondeur d'eau n'excède pas quelques dizaines de centimètres, l'interaction du banc avec les vagues tend à supprimer les ondes capillaires. Cette variation d'état de la surface de l'eau se traduit sur les images radar : l'eau calme se comporte comme un miroir et la rétrodiffusion est très faible (réflexion quasispéculaire).

Parties émergées des bancs

Sur les images radar, on observe également la partie émergée des bancs ayant en général une radiométrie forte. Les observations réalisées sur le terrain mettent en évidence l'influence de la forte rugosité de surface sur l'augmentation de la radiométrie. Les parties rugueuses sont donc imagées comme des zones claires (cf. Figure 5). Certaines zones émergées ont une rugosité moyenne et possèdent un coefficient de rétrodiffusion variant entre -13dB et -21dB pour RADARSAT à 28°. D'autres zones émergées sont très rugueuses et ont un coefficient de rétrodiffusion de -4dB à -9dB.

Comme on peut le constater sur l'image radar (Figure 5), il est difficile de faire la différence entre les bancs de vase émergés et la mangrove. La distinction peut se faire grâce à la différence de texture de ces deux entités. En effet, la mangrove est un peu plus homogène que les bancs émergés. Cependant, cette faible différence ne permet pas de dire si un banc est colonisé ou non par la mangrove, et rend la délimitation de la côte difficile.

Lacs de vase

Pendant la campagne de terrain de mars 2003, on a relevé la présence de plusieurs lacs de vase, constitués de vase fluide concentrée (de 350 à 450 g/l). La forte viscosité de la crème de vase qui les constituent dissipe les ondes capillaires ce qui rend la surface des lacs de vase très lisse et facilement détectable (cf. Figure 6). Le signal radar est réfléchi de façon spéculaire. Les limites du lac de vase sont nettes.

Cependant, il est parfois difficile de faire la différence par simple photo-interprétation entre les lacs de vase et certains bancs immergés. Le coefficient de rétrodiffusion de ces deux entités étant très souvent du même ordre de grandeur. La discrimination de ces deux entités s'appuie sur les connaissances de la structure des bancs : les lacs de vase sont facilement détectés sur l'image radar même s'ils ne sont pas protégés de la houle. La crème de

vase s'accumule en aval du banc (au nord-ouest) et sur sa partie extérieure, côté mer. Les lacs de vase donnent l'impression de se rajouter au banc existant. La partie faiblement immergée des bancs n'est quant à elle visible que si elle est protégée de la houle. Cette entité n'est observée qu'à l'intérieur du banc, ou derrière une barre vaseuse et fait partie intégrante des bancs.

Barres vaseuses et micro-reliefs

Enfin, on observe la formation de barres vaseuses et de micro-reliefs. La barre vaseuse se présente comme une flèche d'accumulation de vase de faible altitude relative. Elle peut se développer sur plusieurs kilomètres. A basse mer, elle reste séparée de la côte par une zone faiblement immergée (cf. Figure 7). Les barres se forment sous l'action de la houle par liquéfaction, transport puis accumulation de la vase en zone proche subtidale. Elles constituent une barrière contre la houle. Constituant une partie émergée particulière, les barres vaseuses possèdent une rétrodiffusion très forte.

Sur la plage de Rémire-Montjoly (Cayenne), nous avons observé une micro-falaise immergée d'environ 30 cm de haut (mesurée sur le terrain). Sur l'image radar, elle est détectée par la présence d'un front brillant qui doit correspondre aux déferlements des vagues sur un faible fond. La rétrodiffusion radar au niveau des micro-reliefs est forte.

3.2 Influence de la hauteur d'eau sur le signal radar

L'action des bancs sur l'état de la mer (vagues) est directement lié à la hauteur de l'eau. Les différences constatées entre deux images sont imputables aux nombreux facteurs variables entre elles : les paramètres d'acquisition des images, les conditions de mer, l'évolution naturelle des bancs avec le temps, et la hauteur de marée. Pour étudier l'influence propre de la hauteur d'eau, il faut utiliser des images acquises à différents niveaux de marée mais avec des paramètres d'acquisition (angle d'incidence et date d'acquisition) les plus proches possibles.

Les images du 17/07/2002, 03/09/2002 et 14/11/2002 ont été acquises avec des configurations identiques (même angle d'incidence) mais séparées de plusieurs mois (de 2 à 4 mois). La différence des hauteurs de marée est au minimum de 9 cm et au maximum de 24 cm (cf. Tableau 1).

On constate l'influence de la hauteur d'eau en 1A, 1B et 1C de la figure 8. Une partie du banc, immergé en 1A est détectée en 1B et 1C (zones sombres).

De même, on constate des tâches claires en 1B et 1C qui correspondent très probablement aux parties émergées du banc, c'est à dire à ses parties les plus hautes. En 1C, les zones claires qui émergent sont plus nombreuses car la hauteur d'eau est la plus faible. On observe la même progression en 2A, 2B et 2C. La surface 2C est en grande partie émergée alors qu'en 2A, seules les deux petites barres vaseuses restent émergées. Cependant, le banc émergé en 3A le 17/07/2002 (à l'extrémité de la flèche vaseuse) a disparu sur les images du 03/09/2002 et 14/11/2002. La hauteur d'eau étant la plus importante le 17/07/2002, on peut conclure que cette variation est due à l'évolution intrinsèque du banc.

3.3 Relation entre signal radar et angle d'incidence

La détection des bancs de vase est fortement liée à l'angle d'incidence (θ). Baghdadi et al., [2004] ont constaté une meilleure discrimination des zones de faibles rétrodiffusion radar pour des faibles angles d'incidence. La Figure 9 confirme cette conclusion. Ainsi, les différentes structures de la frange intertidale sont mieux détectées pour les images acquises avec un angle d'incidence de 28°. Pour les images acquises avec des forts angles d'incidence, on n'observe au contraire que peu d'informations. Malgré la faible hauteur d'eau de l'image acquise le 20/06/2002 à fort angle d'incidence, le banc est moins visible que sur l'image du 17/07/2002 acquise à faible incidence et pour une hauteur d'eau supérieure d'une vingtaine de centimètres à celle du 20/06/2002. Les images qui ont été comparées sont acquises à quelques jours d'intervalle seulement. Il est clair que l'évolution journalière des conditions météorologiques peut apporter des différences significatives et limite les possibilités de comparaison stricte du niveau de signal RADAR rétrodiffusé. L'influence de l'angle d'incidence n'a donc pu être établie que d'une manière statistique par inter-comparaison de bon nombre d'images.

Le contraste entre les différents éléments du banc est également meilleur pour un petit angle d'incidence.

La Figure 9 montre une bonne détection des bancs faiblement immergés (zones à radiométrie faible) seulement pour l'image acquise à faible angle d'incidence.

3.4 Recommandations concernant l'utilisation des images radar

L'imagerie radar permet de discriminer différentes entités constitutives des bancs, essentiellement dans

la zone intertidale et proche subtidale par faible profondeur d'eau. Les zones subtidales sous plusieurs mètres d'eau ne présentent pas de signature pouvant être discriminées par l'imagerie radar. Cette observation montre qu'il faut rester très vigilant lors de l'interprétation des images radar et qu'il est nécessaire d'utiliser les valeurs radiométriques pour limiter les ambiguïtés entre les différents états des bancs. Certaines zones émergées ont une rugosité moyenne et possèdent un coefficient de rétrodiffusion variant entre -13dB et -21dB pour RADARSAT à 28°. A titre d'exemple, les zones émergées très rugueuses ont un coefficient de rétrodiffusion entre -4dB et -9dB, et les zones immergées sous une faible couche d'eau et qui sont en général lisses entre -21dB et -25dB.

4. Analyse des images optiques

4.1 Interprétation

Pour le traitement des images optiques multibandes, la première étape consiste à déterminer les bandes spectrales les plus pertinentes pour l'étude des bancs de vases. Les multiples bandes disponibles garantissent une caractérisation précise des objets de l'image par leur seule signature spectrale.

De la même façon que pour les images radar, la photo-interprétation des images optiques est présentée pour une image particulière. L'image LANDSAT du 19/09/2002. Un segment de l'image est présenté sur la Figure 10. Les teintes vert-jaune correspondent à la végétation/mangrove, la teinte violet à l'eau turbide du large, les parties des bancs immergés ont une teinte bleu/vert et les parties émergées ont une teinte jaune/orange.

L'eau du large et la houle

Des études sont menées actuellement pour établir le lien entre la couleur de l'eau et sa concentration en matières solides dans le cas de forte turbidité [Froidefond et al., 2002 ; Doxaran et al., 2002]. Il en ressort une nette corrélation entre ces deux agents.

Les matières transportées par l'eau sont en général détectées dans les bandes du vert et du jaune. Ce sont les bandes spectrales utilisées pour la détection des MES de couleur jaune à brun [Froidefond et al., 2002]. On observera donc la couleur de l'eau principalement avec les bandes TM2 (vert) et TM3 (rouge).

Dans la bande du PIR, l'eau très turbide est bien détectée à proximité des bancs. Sur l'image du 19/09/2002, on peut observer différentes couleurs de l'eau avec la composition colorée (MIR, PIR, vert)

(cf. Figure 10). Loin au large, l'eau est très sombre car elle ne transporte quasiment pas de sédiments comparativement à l'eau de la côte. Plus près de la côte, l'eau chargée en MES se présente en composition MIR/PIR/vert sous une couleur violette. Cette couleur de l'eau est détectée près des côtes, à l'embouchure de certains fleuves, et à proximité des bancs.

La houle est beaucoup plus nette que sur les images radar, mais elle est rarement visible. Sur toute la base de données optiques, la houle n'est visible que sur une seule image : l'image SPOT 4 du 14/12/2001 (Figure 11). Les crêtes de houle sont très nettes dans toutes les bandes. On remarque aisément l'évolution de la forme de la houle avec celle de la géomorphologie de la côte. Sur cette image, le régime de houle varie avec la profondeur du fond. Derrière la barre vaseuse (vers la côte), l'eau est parfaitement calme. Seules les ondes générées localement par le vent peuvent se propager au-delà de la barre émergée.

Parties immergées des bancs

Les bandes du MIR (TM5 et TM7) permettent une bonne discrimination des surfaces situées au dessus des parties immergées du banc sous une faible tranche d'eau. Dans les bandes du PIR et du visible, cette détection est plutôt mauvaise car la radiométrie de ces surfaces est du même ordre de grandeur que celle des parties émergées du banc (cf. Figure 12). Dans les bandes du MIR, le banc de vase immergé apparaît en gris foncé alors que le banc émergé apparaît en blanc.

Parties émergées des bancs

Les bandes du moyen infrarouge (MIR) permettent dans la plupart des cas d'établir la limite eau libre / banc émergé. Cette limite est nette : la réflectance des terres nues émergées est forte (région 4, Figure 12), alors qu'elle est très faible pour l'eau. La végétation a aussi une radiométrie faible dans la bande du MIR. Le MIR peut servir à distinguer les bancs émergés de la végétation et de l'eau.

Dans la partie émergée (région 4), la réponse détectée dans la bande TM2 (vert-jaune) n'est pas homogène : deux barres vaseuses se découpent avec une réflectance très faible en région 5. Cette bande spectrale sert à caractériser les zones humides. Les deux flèches qui apparaissent en noir sur la bande TM2 sont des parties moins humides du banc. Elles appartiennent très probablement à une zone plus haute de la slikke qui est davantage drainée que le

reste du banc lors de la prise d'image. De plus, on remarque sur les autres images satellitaires proches dans le temps que ces zones moins humides sont toujours émergées, jusqu'à un niveau de marée de 2 mètres. Les observations réalisées lors de la campagne de terrain de mars-avril 2003 ont été confrontées à l'image SPOT du 16/03/2003 et permettent de confirmer que cette réflectance particulière n'est pas liée à la présence de végétation pionnière.

Mangrove

La mangrove a une très forte radiométrie dans la bande du PIR (cf. Figure 12). Cette bande suffit à elle seule à discriminer la végétation du reste. Le NDVI (indice de végétation) permet également une bonne cartographie de la mangrove.

Lacs de vase

Le lac de vase, observé près de Kaw lors de notre campagne terrain de mars 2003, n'est pas mis en évidence sur l'image SPOT acquise le 16/03/2003. L'image composite (MIR/PIR/Vert) de la Figure 13 pourrait traduire la présence du lac de vase par une zone en vert clair présentant un faible contraste avec les zones turbides extérieures ainsi qu'avec les parties immergées du banc. Le contraste provient de la bande PIR mais reste trop limité pour une discrimination aisée. Quant aux autres bandes spectrales, elles ne permettent pas de détecter les lacs de vase.

4.2 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur l'image LANDSAT du 19/09/2002. Cette analyse a permis de connaître les canaux les plus pertinents pour la cartographie des bancs.

Les résultats obtenus ont révélé que les deux premières composantes principales contiennent respectivement 78.2% et 19.9% de l'information existante sur l'image. La matrice des vecteurs propres montre que toutes les bandes spectrales ont une large contribution dans la première composante des vecteurs propres. Le maximum de l'information est toutefois apporté par les bandes TM5 et TM3. Par ailleurs, la bande TM4 (PIR) est la composante la plus représentée dans le deuxième vecteur propre.

La Figure 14 illustre les différentes composantes principales issues de l'image du 19/09/2002. La première composante présente peu de contraste et ne permet pas une bonne distinction entre objets. Les CP2 et CP4 permettent la distinction non ambiguë de

la végétation avec le banc. La CP3 permet une bonne discrimination des parties émergées et faiblement immergées du banc. Cependant, il y a ambiguïté entre la mangrove et le banc immergé. La CP5 permet une bonne cartographie des parties émergées (teinte claire). La CP6 n'est pas très pertinente pour la cartographie des entités côtières.

4.3 Influence de la hauteur d'eau sur l'imagerie optique

Pour étudier le lien entre la hauteur d'eau et la capacité des capteurs optiques à détecter les bancs de vase, nous avons étudié les images de 05/08/2002 et 19/09/2002 (cf. Figure 15). Elles sont distantes de 45 jours et présentent une différence de hauteur de marée d'environ 0.86 m. C'est une différence importante, qui devrait avoir une influence visible sur la détection des bancs. Compte tenu de la pente moyenne des bancs, cette variation de la hauteur d'eau devrait entraîner une extension de la zone émergée de plusieurs centaines de mètres pour l'image du 19/09/2002. Sur l'image du 05/08/2002 (H=2.02 m à Cayenne), on peut constater l'avancée de l'eau (en bleu) sur les zones émergées (en orange) sur l'image du 19/09/2002 (H=1.16 m à Cayenne). La comparaison de ces deux images montre une relation directe entre la détection des parties émergées et faiblement immergées vis-à-vis de la hauteur de marée. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que certains des changements observés entre les deux dates sont dus à l'évolution intrinsèque du banc au cours des 45 jours. L'extension de la partie faiblement immergée (vert foncé) résulte très certainement de la modification de hauteur d'eau tandis que l'apparition de zones d'eau turbide (violet) est plus probablement liée à une modification du forçage océanique. Des mesures de MES réalisées le 05/08/2002 ont en effet mis en évidence, une très faible turbidité (5 mg/l) lié à un forçage océanique très faible.

5. Comparaison entre images radar et optiques

5.1 Relation entre hauteur d'eau et signal enregistré par les capteurs radar et optiques

Nous avons constaté au cours de la photo interprétation qu'il est préférable d'acquérir les images à de faibles hauteurs d'eau afin de garantir une extension maximale de la partie émergée du banc facilement détectable, ce qui n'est pas le cas des parties immergées. Ces dernières sont difficiles à détecter sur des images optiques dès lors qu'elles se trouvent

sous une certaine tranche d'eau, la reconnaissance du fond étant « masquée » par la forte turbidité de l'eau. Sur les images radar, c'est l'état de la surface de l'eau (forte rugosité) qui ne « trahit » plus la présence de fonds vaseux sous une certaine épaisseur d'eau. Il existe en effet une profondeur limite au-delà de laquelle le banc n'est plus détectable. Nous avons évalué cette limite à une dizaine de centimètres, pour une analyse comprenant l'ensemble des données optiques et radar. Pour certaines images optiques acquises avec des conditions de forçages océaniques faibles, des entités du banc en zone intertidale présentent des signatures pour de profondeur d'eau de plus d'un mètre [Gratiot et al., 2003].

Grâce aux campagnes des levés bathymétriques qui ont été réalisées dans les zones de bancs, nous avons pu déterminer la profondeur d'eau limite pour la détection des parties immergées des bancs.

Les images les plus proches des levés bathymétriques sont l'image RADARSAT du 25/03/2003 et l'image SPOT du 16/03/2003. Nous avons recherché sur ces deux images d'éventuelles correspondances entre la hauteur d'eau et le signal radar d'une part et la hauteur d'eau et la radiométrie optique d'autre part. La profondeur d'eau est obtenue par la différence entre la bathymétrie ramenée au zéro marin et la hauteur d'eau au moment de la prise de vue. Au voisinage de chaque point de mesure bathymétrique, nous avons défini une zone de quelques pixels représentative de ce point. La zone doit être assez petite pour qu'un pixel reste assimilable à la zone du levé bathymétrique, mais aussi contenir suffisamment de pixels pour réduire au mieux le bruit (speckle pour l'image radar). La radiométrie moyenne (digital number) et le coefficient de rétrodiffusion moyen (σ°) ont été obtenus pour chaque zone à partir des images SPOT et RADARSAT.

La Figure 16 montre que le signal radar augmente légèrement avec la profondeur de l'eau pour les zones ayant une profondeur d'eau entre 0 et 0.3 m. Cette relation correspond en partie à ce qui a été observé sur le terrain lors de la campagne de mesures : la surface de l'eau est plus agitée quand la profondeur de l'eau est importante (cf Figure 4). Cependant, la forte corrélation observée sur le terrain entre la rugosité de la surface de l'eau et la profondeur est mal retranscrite par le radar en bande C. La Figure 16 montre un comportement exponentiel entre le σ° et la bathymétrie. Baghdadi et al., [2002] observaient sur des terres agricoles une augmentation du signal radar en fonction de la rugosité de surface. Cette augmentation est nette pour des rugosités inférieures ou égales à environ

1.5 cm (écart type des hauteurs). Au-delà de ce seuil de rugosité qui dépend des caractéristiques du capteur (longueur d'onde, polarisation et angle d'incidence), le signal radar devient insensible à la rugosité de surface.

Sur l'image optique, la relation entre la radiométrie et la profondeur des bancs est beaucoup plus claire (Figure 17). On observe une bonne corrélation entre la radiométrie et la profondeur des points de bathymétrie. Les graphiques de la Figure 17 montrent le comportement des quatre bandes XS1 à XS4 de l'image SPOT du 16/03/2003, en fonction de la profondeur du banc.

Dans les bandes XS3 (PIR) et XS4 (MIR), la relation entre la radiométrie et la profondeur de l'eau est très nette. La radiométrie décroît avec la profondeur de l'eau jusqu'à une profondeur d'environ 0.3 m et reste constante au delà de cette valeur. Dans la bande XS1 (vert), on peut voir une faible augmentation de la radiométrie avec la profondeur quand cette dernière est inférieure ou égale à environ 0.2 m. Quant à la bande XS2 (rouge), elle montre pour le site de Kourou une faible décroissance de la radiométrie quand la profondeur de l'eau augmente jusqu'à la valeur d'environ 0.3 m. La courbe obtenue sur Kaw est très bruitée dans la bande XS2.

En conclusion, seules les bandes XS3 (PIR) et XS4 (MIR) sont fortement corrélées à la profondeur des bancs immergés, entre 0 et 0.3 m de profondeur au maximum. Il semble toutefois que la profondeur critique de détection d'entités du bancs au moyen d'images optique et radar puisse être améliorée en prenant en considération la variation d'autres paramètres tels que le forçage océanique et les conditions de marées (vives eaux, mortes eaux).

5.2 Capacité de détection des différentes unités morphologiques des bancs de vase

Certaines parties des bancs de vase sont facilement détectables avec l'un ou l'autre des deux systèmes de télédétection (optique ou radar). En effet, des phénomènes affectant la surface de l'eau sont révélateurs de la présence de bancs de vase. Les phénomènes qui traduisent la présence des bancs sont différents. Par imagerie radar, on observe les bancs grâce à une éventuelle modification de la surface de l'eau (diminution/augmentation de la rugosité). Par imagerie optique, on observe la couleur des bancs et de l'eau. Les images optique et radar acquises aux dates les plus proches et avec des hauteurs de marée équivalentes (16/03/03 et 25/03/03) ont été comparées. Voici les conclusions obtenues unité par unité :

- Les lacs de vase sont détectés sur les images radar et ne sont pas faciles à distinguer sur les images optiques. La signature des lacs de vase sur les images optiques est très proche de celle des parties subtidales des bancs ou des bancs immergés.
- La partie subtidale du banc peut s'étendre loin vers le large. La partie proche subtidale (profondeur d'eau n'excédant guère un mètre) peut être partiellement discriminée à partir des images optiques acquises à marée montante avec un faible forçage océanique. Cette discrimination devra être précisée à partir d'études complémentaires. La concentration des MES n'est pas suffisante pour influencer la diffusion de Bragg sur l'image radar. On ne détecte aucune variation du coefficient de rétrodiffusion de l'eau dans les zones où devrait se trouver l'extension subtidale des bancs. Le sens de la marée – déterminant pour la détection des parties subtidales par imagerie optique – ne semble pas avoir d'influence sur l'image radar.
- Les parties faiblement immergées sont détectables par imagerie optique et radar. Sur les images optiques, ces zones ont une forte radiométrie dans la bande du PIR et dans le visible. Elles ont une faible radiométrie dans la bande du MIR. Sur les images radar, elles ont un faible coefficient de rétrodiffusion, du même ordre de grandeur que celui des lacs de vase.
- La détection des zones supratidales et slikke par les systèmes optique et radar est aisée. Les zones supratidales sont caractérisées par des surfaces rugueuses, ayant un fort coefficient de rétrodiffusion radar. Des surfaces sèches (plus que toutes les autres parties du banc), ayant une réflectance forte dans la bande du MIR. Elles ont aussi une réflectance faible dans les bandes du vert et du rouge.
- La distinction entre la mangrove et les bancs émergés est très difficile avec les images RADARSAT. En revanche, elle est très facile avec l'imagerie optique.

6. Evolution du trait de côte

La cartographie du trait de côte (limite d'émersion) constitue une information importante pour les gestionnaires et les politiques d'aménagement du littoral. Elle est facilitée et accélérée par l'utilisation des données radar en raison des difficultés d'accès au terrain et par le fait qu'elles sont disponibles contrairement aux données optiques quelle que soit la couverture nuageuse. Ainsi, l'utilisation d'images

multidates ERS et RADARSAT permet de réaliser le suivi de l'évolution du trait de côte.

L'évolution du trait de côte est directement lié au cycle d'envasement et d'érosion. Le passage des bancs de vase sur une zone de la côte se traduit par des avancées ou des reculs des terres. La Figure 18 montre les différents sens de déplacements côtiers près du Mahury entre 1997 et 2003. Les images radar utilisées ont été choisies avec une faible hauteur d'eau et du même ordre de grandeur pour toutes les images (entre 1.46 m et 1.62 m). Certaines images utilisées sont issues des archives BRGM (ERS et RADARSAT). Entre 1997 et 2000, la région est en période d'envasement. L'avancée du trait de côte entre ces deux dates est assez importante, de l'ordre de 1 km au maximum. A partir de 2001, les variations du trait de côte sont mineures à cet endroit. En 1997, la côte est découpée en dents de scies caractéristiques des zones en érosion [Froidefond et al., 1988]. Dès 2002 en revanche, la côte est beaucoup moins découpée, car elle se trouve dans une période d'engraissement. Cette Figure montre que le radar est très adapté à la cartographie et à la mise à jour du trait de côte.

7. Conclusions et perspectives

L'impact économique négatif qu'induit le déplacement des bancs de vase sur le littoral guyanais justifie la recherche de moyens de détection qui permettraient d'en suivre le déplacement en temps quasi réel. La détection de variations de la rugosité de surface des zones proche subtidales et intertidales, au moyen d'images radar, est apparue intéressante dans la mesure où ces données sont indifférentes à la présence de nuages. Cette variation de rugosité est susceptible de correspondre à une augmentation de la rugosité liée au déferlement des vagues causée par la présence du banc, ou à une diminution liée à un amortissement des vagues. Dans un tel contexte, les images satellitaires peuvent constituer un outil privilégié d'acquisition d'information actualisée et répétitive. Grâce à une programmation pertinente, les images spatiales pourraient permettre de constituer des bases de données indispensables à la gestion des zones côtières.

L'objectif de cette étude était d'étudier le potentiel des images satellitaires pour la cartographie de l'évolution de l'environnement côtier en contexte climatique équatorial, en privilégiant l'établissement d'un diagnostic rapide, pour proposer un outil opérationnel de localisation des bancs de vase. Pour une meilleure détection des bancs de vase,

l'acquisition des images doit se faire à des dates où la hauteur d'eau est faible.

L'utilisation d'images radar à faibles angles d'incidence permet une meilleure cartographie des bancs de vase. De même, les résultats montrent un intérêt complémentaire quant à l'utilisation des images radar et optique pour la cartographie des bancs de vase. Certains objets sont mieux détectés avec l'imagerie radar et d'autres avec l'imagerie optique. A l'heure actuelle, les images optiques et radar s'avèrent inefficace pour la discrimination de la limite des bancs dans les zones subtidales (plusieurs mètres de profondeur). Les analyses réalisées sur les images radar et optique les plus proches de la période du relevé bathymétrique, a permis d'établir une relation entre l'imagerie radar et optique et la profondeur de l'eau si cette dernière est comprise entre 0 et 30 cm. La relation obtenue à partir de l'image optique (bandes MIR et PIR) est plus nette que celle obtenue avec l'image radar. Dans le futur, des mesures bathymétriques pour les faibles profondeurs seront nécessaires pour mieux analyser le comportement du signal radar ou optique en fonction de la bathymétrie. Ces mesures seront réalisées à marée haute avec un écho sondeur 200 kHz et un plomb de sonde.

Si l'utilisation de l'imagerie satellitaire s'avère rapide et relativement peu onéreuse au regard des méthodes de terrain conventionnelles, elle ne rencontre toutefois plus de limite comme celle des anciens capteurs dont la plus importante correspondait à la difficulté d'obtenir des images en temps réel (il était impossible de programmer des prises de vue sur ERS par exemple) Le nouveau capteur radar ASAR d'ENVISAT est multipolarisations et celui qui sera lancé prochainement est polarimétrique (RADAR-SAT-2), ce qui va sans doute permettre une meilleure caractérisation du milieu côtier.

Références

- Allard J. F. (1997) Cartographie de l'évolution du trait de côte en Guyane de 1950 à 1994, *Rapport BRGM, R-39506*.
- Baghdadi N., King C., Bourguignon A., and Remond A. (2002) Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no 17, pp. 3427-3442.
- Baghdadi N., Gratiot N., Lefebvre J.P., Oliveros C., and Bourguignon A., (2004) Coastline and mudbank monitoring in French Guiana : Contributions of radar and optical satellite imagery.

- Doxaran D., Froidefond J.M., Lavender S., Castaing P., (2002) Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations, *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, no. 1, pp.149-161.
- Eisma D., Augustinus P., and Alexander C. (1991) Recent and sub-recent changes in the dispersal of Amazon mud, *Netherlands Journal of Sea Research*, vol. 28, pp. 181-192.
- Froidefond J.M., Gardel L., Guiral D., Parra M., and Ternon J.F. (2002) Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence, *Remote Sensing of Environment*, no. 80, pp. 225-232.
- Froidefond J.M., Pujos M. and André X. (1988) Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana, *Marine Geology*, vol. 4, pp. 19-30.
- Gratiot N., Lefebvre J.P., Baghdadi N. and Oliveros C. (2003) Structuration des bancs de vase : rôle des barres vaseuses et hypothèses de fonctionnement, *9^{ème} congrès de l'Association des Sédimentologues Français, 14-16 octobre 2003, Bordeaux*.
- Trebossen H., Rudant J.P., and 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. Exemples en Guyane Française et au Cameroun, *Bulletin de la SFPT*, no 161, pp. 29-39.
- Rakotoarivony L., Taconet O., Vidal-Madjar D., Bellemain P., and Benallègue M. (1996) Radar backscattering over agricultural bare soils, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 10, no 2, pp. 187-209.
- Vogelzang J., Ruddick K.G., and Moens J.B. (1997) On the signatures of river outflow fronts in radar imagery, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no 16, pp. 3479-3505.
- Wells J.T., and Coleman J.M. (1981) Physical processes and fine-grained sediment dynamics, coast of Surinam, South America, *Journal Sediment. Petrol.*, vol. 51, pp. 1053-1068.

Remerciements

Cet article a été réalisé dans le cadre d'une étude financée par la direction de la recherche du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et le PNEC (Programme National sur l'Environnement Côtier). Les données marégraphiques ont été fournies par le service hydrographique de la ODE-Guyane.

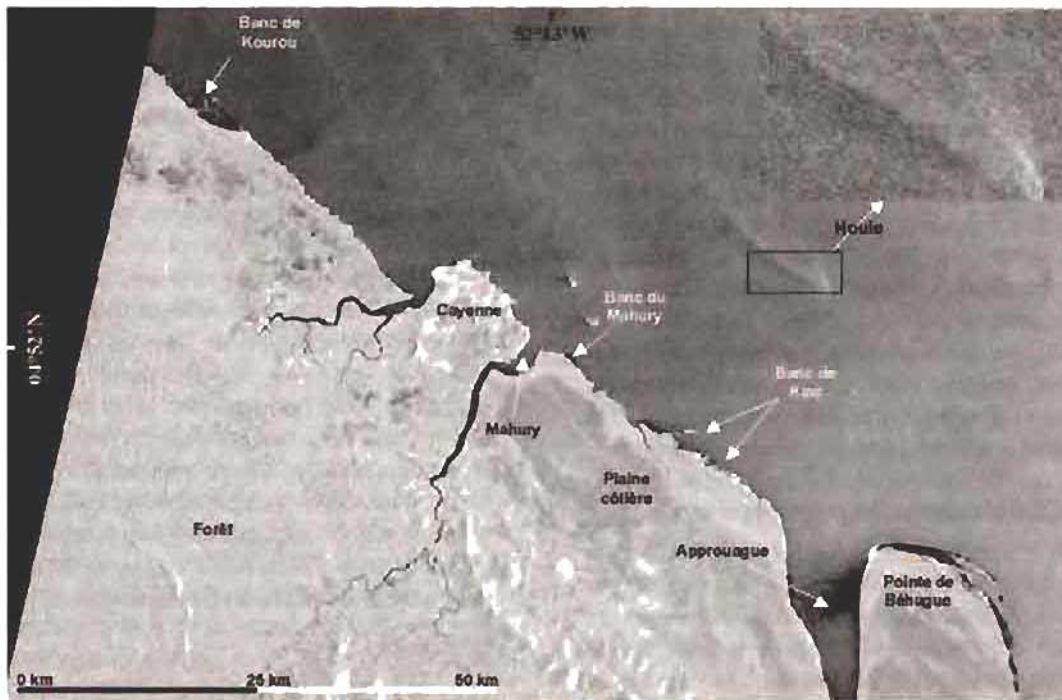


Fig. 2 Image RADARSAT du 14/11/2002 (mode descendant : $\theta = 28^\circ$; $H = 1.46$ m à Kourou et 1.57 m à Cayenne), échelle - 1:700 000.



Fig. 3 Exemple d'un banc immergé (banc de Kourou), échelle - 1:100 000

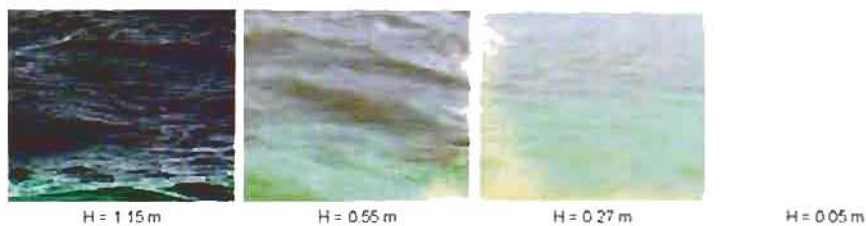


Fig. 4 Influence de la hauteur d'eau (H) sur l'amplitude des vagues capillaires. Les photos ont été prises le 1^{er} avril 2003, à proximité du banc de Kourou.

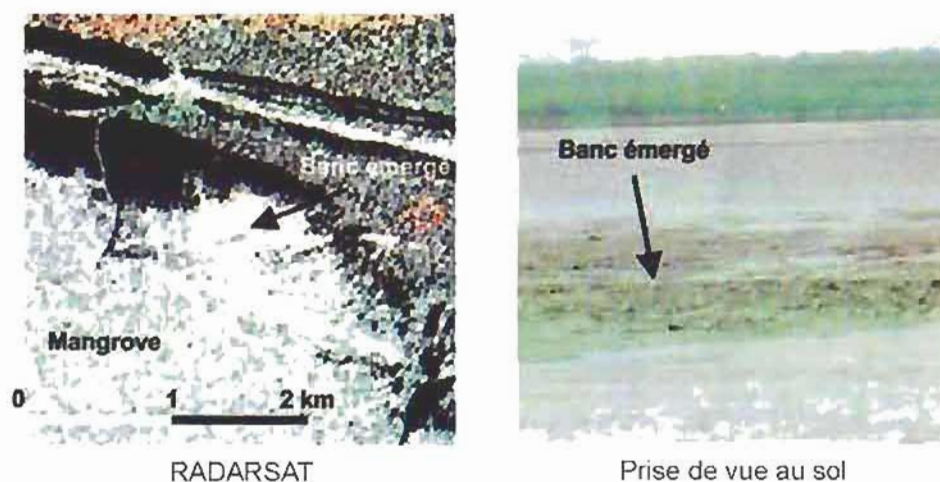


Fig. 5 Exemple d'un banc émergé sur l'image RADARSAT du 14/11/2002 (banc de Kaw).

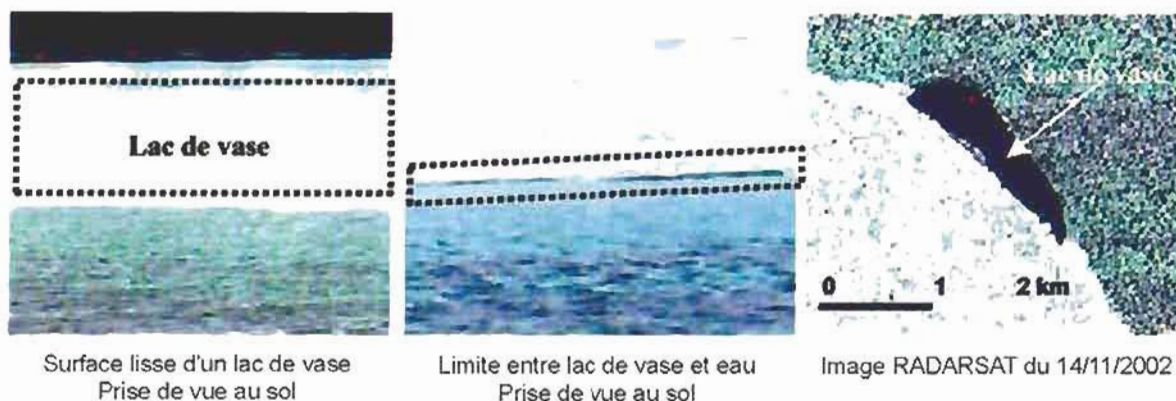


Fig. 6 Exemple de lac de vase près du Mahury.

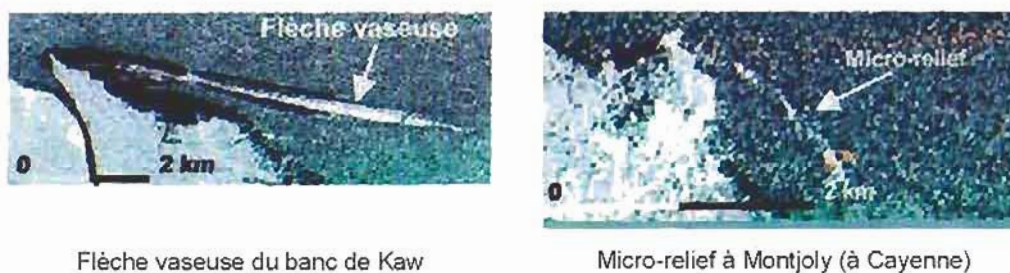


Fig. 7 Exemple d'une flèche vaseuse et d'un micro-relief.

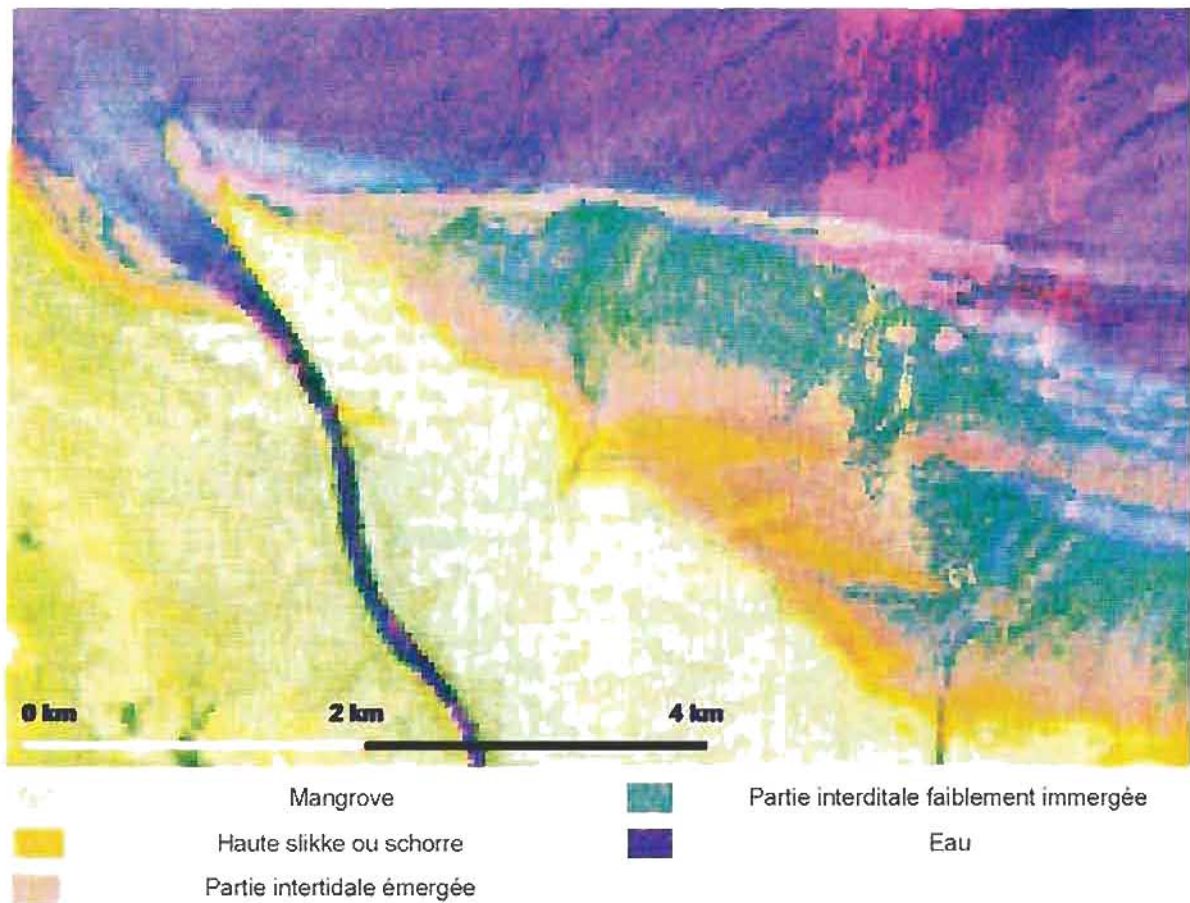


Fig. 10 Interprétation d'un segment de l'image LANDSAT du 19/09/2002 (MIR/PIR/Vert)
Banc de Kaw, H=1.16 m, échelle ~ 1:45 000.



Fig. 11 Propagation de la houle dans la région de Kaw observée sur l'image SPOT du 14/12/2001
(bande XS1), échelle ~ 1:100 000.

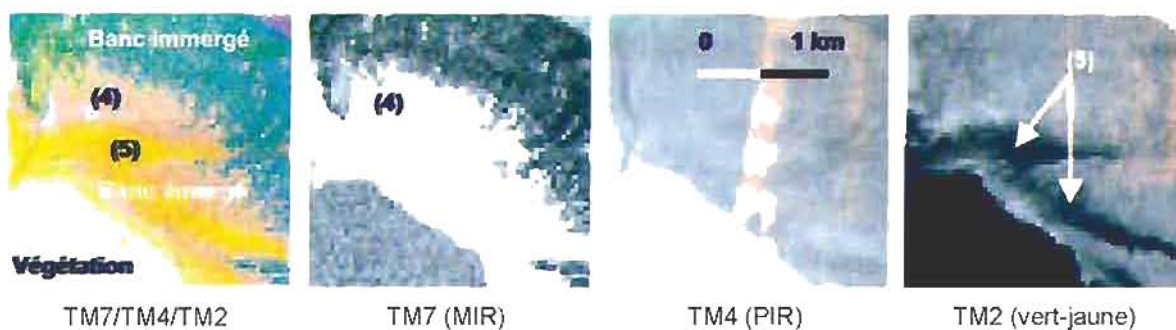


Fig. 12 Exemple de bancs émergés et immergés sur l'image LANDSAT du 19/09/2002
(banc de Kaw, H=1.16 m), échelle ~ 1:50 000.

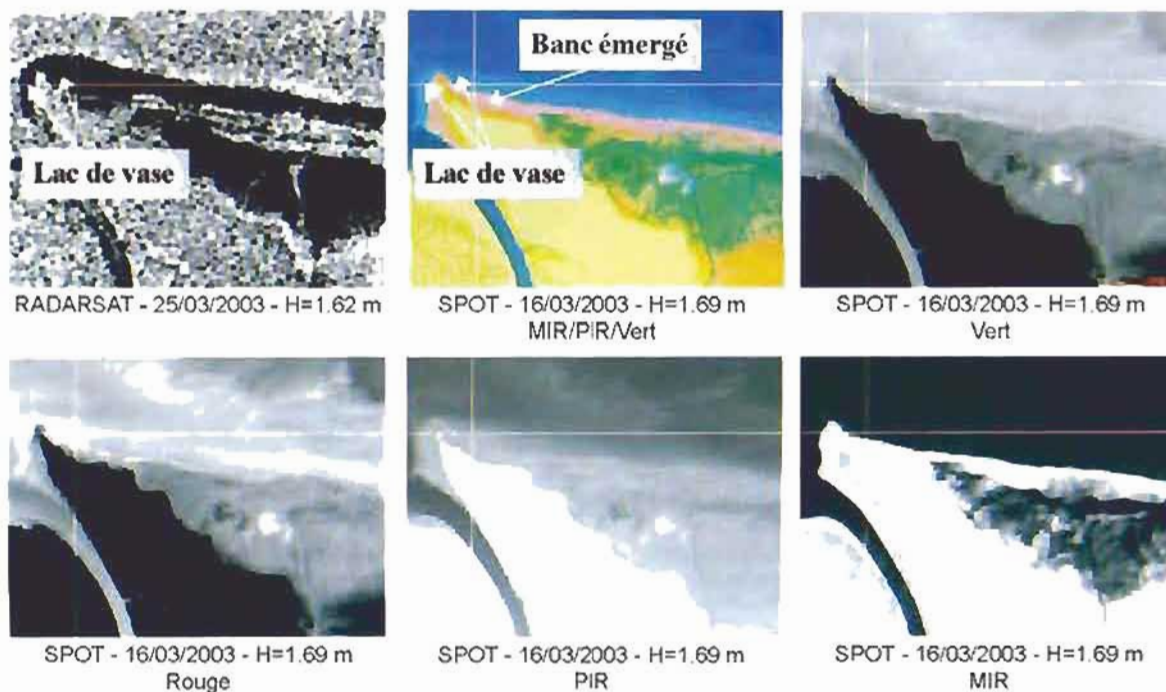


Fig. 13 Exemple d'un lac de vase sur l'image SPOT de 16/03/2003 (banc de Kaw), échelle ~ 1:65 000.

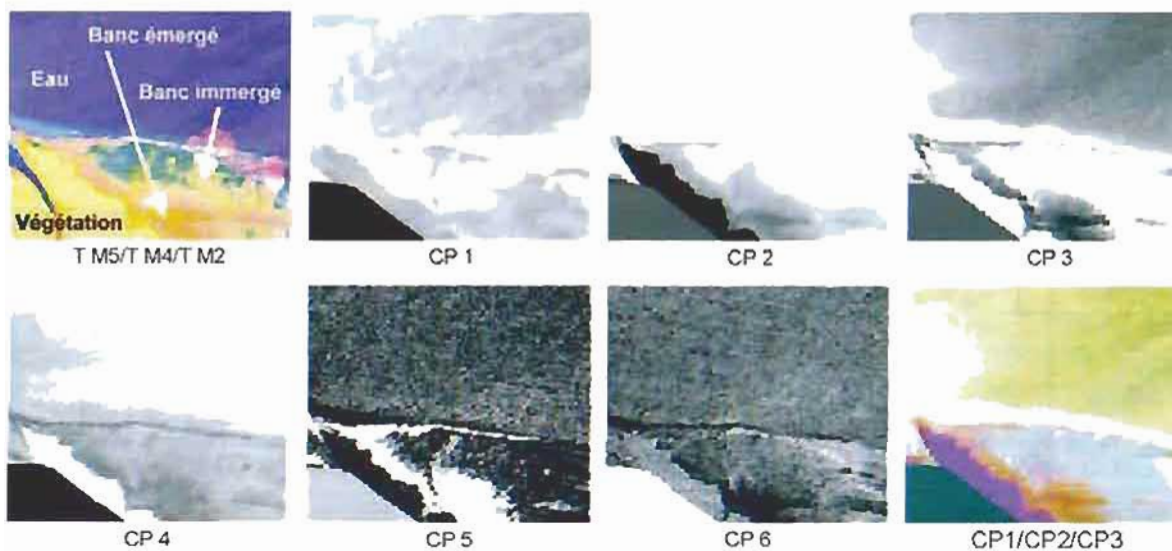


Fig. 14 Composantes principales calculées sur l'image du 19/09/2002 : Banc de Kaw, échelle ~ 1:150 000.

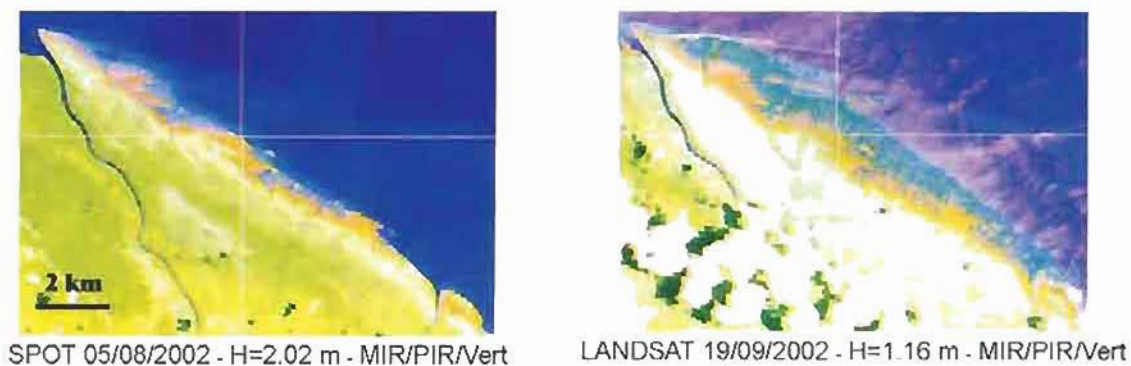


Fig. 15 Influence de la hauteur d'eau (Banc de Kaw), échelle ~ 1:200 000.

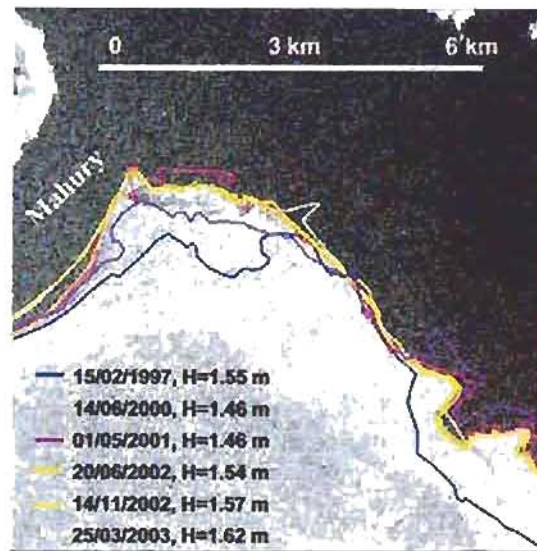


Fig. 18 Potentiel de l'imagerie radar pour le suivi de l'évolution du trait de côte (phénomènes d'érosion et de sédimentation). Différents sens de déplacements côtiers par superposition sur l'image du 20/06/2002 des traits de côtes extraits à partir d'images ERS et RADARSAT acquises entre 1997 et 2003 (échelle - 1:1 00 000).

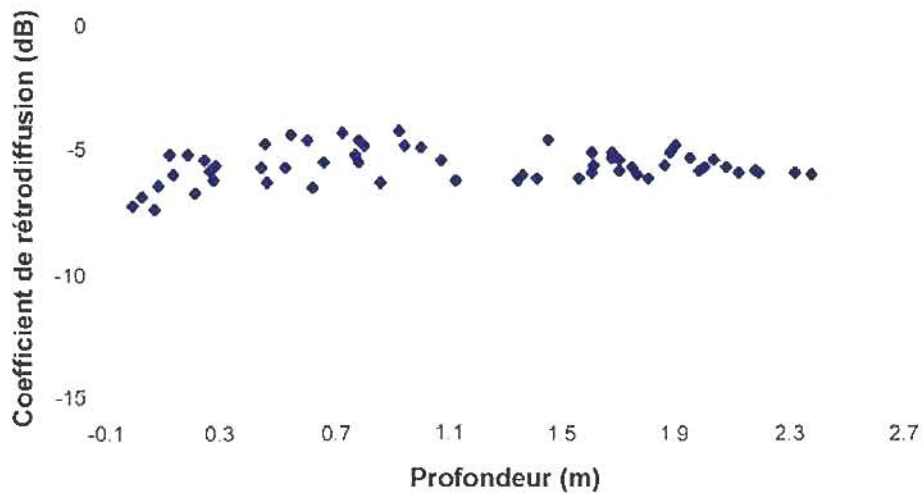


Fig. 16 Relation entre le coefficient de rétrodiffusion issu de l'image RADARSAT du 25/03/2003 (incidence de 28°) et la profondeur de l'eau à l'instant de la prise de vue. Une profondeur négative correspond à une zone émergée

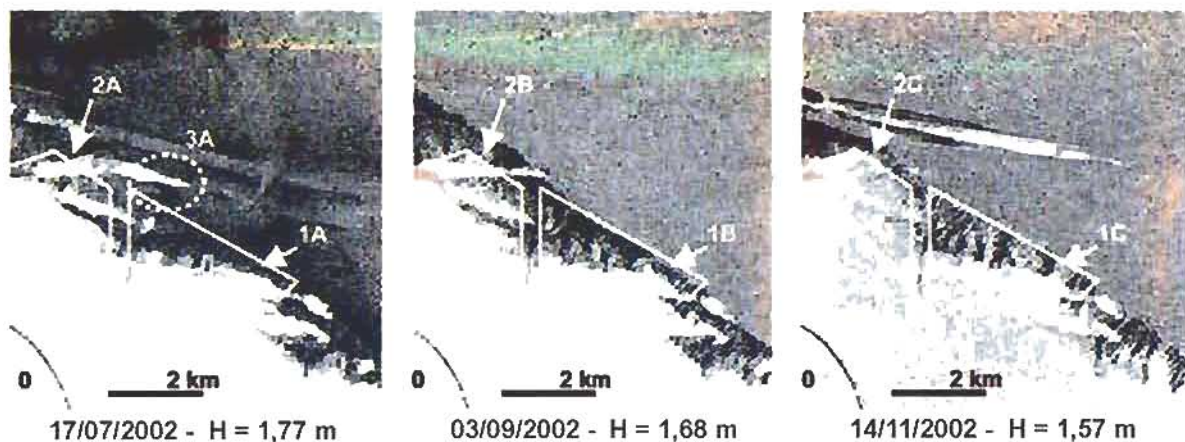


Fig. 8 Comparaison entre les trois images RADARSAT acquises avec les mêmes paramètres instrumentaux (angle d'incidence, $\theta = 28^\circ$) et des hauteurs d'eau légèrement différentes. Cas du banc de Kaw

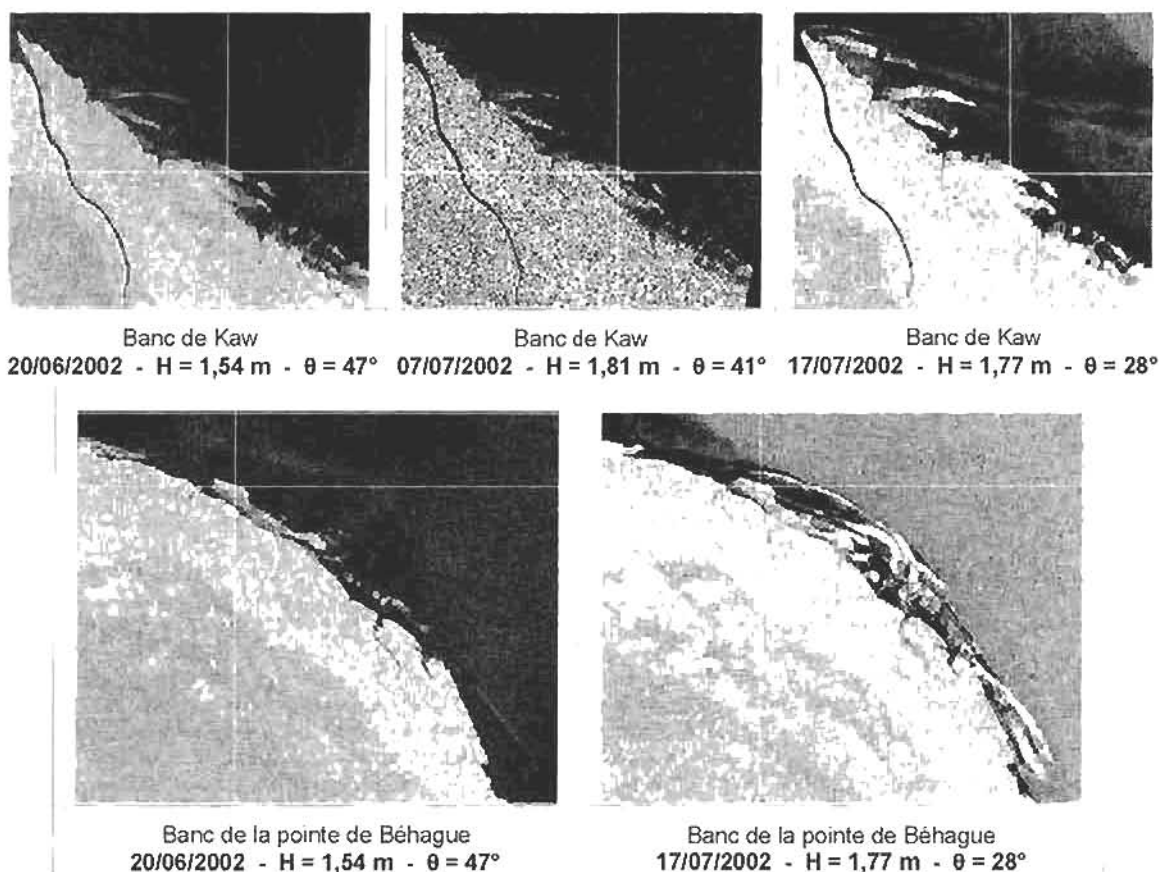


Fig. 9 Influence de l'angle d'incidence sur la détection des bancs de vase.

Tableau I. Principales caractéristiques des images radar et optique utilisées. Les valeurs soulignées en gras correspondent à des hauteurs d'eau obtenues par extrapolation à partir des marégrammes de Kourou.

Date jj/mm/aa	Heure locale d'acquisition	Capteur	Mode - Angle d'incidence	Résolution spatiale (m)	Hauteur de marée Kourou	Hauteur de marée Cayenne	Sens de la marée
14/12/01	11.16	SPOT 4	-	20	<u>1.07</u>	1.18	Montante
20/06/02	06.06	RADARSAT	S7 - 47°	25	1.37	1.54	Montante
07/07/02	06.10	RADARSAT	F2 - 41°	10	1.77	1.81	Descendante
17/07/02	06.18	RADARSAT	S2 - 28°	25	1.70	1.77	Montante
05/08/02	11.16	SPOT 4	-	20	1.89	2.02	Montante
03/09/02	06.18	RADARSAT	S2 - 28°	25	1.56	1.68	Descendante
19/09/02	10.34	LANDSAT 7	-	30/60	1.10	1.16	Montante
21/10/02	10.34	LANDSAT 7	-	30/60	1.20	1.24	Descendante
14/11/02	06.18	RADARSAT	S2 - 28°	25	1.46	<u>1.57</u>	Descendante
16/03/03	11.03	SPOT 5	-	10	1.58	<u>1.69</u>	Montante
25/03/03	18.35	RADARSAT	S1 - 24°	25	1.50	1.62	Montante

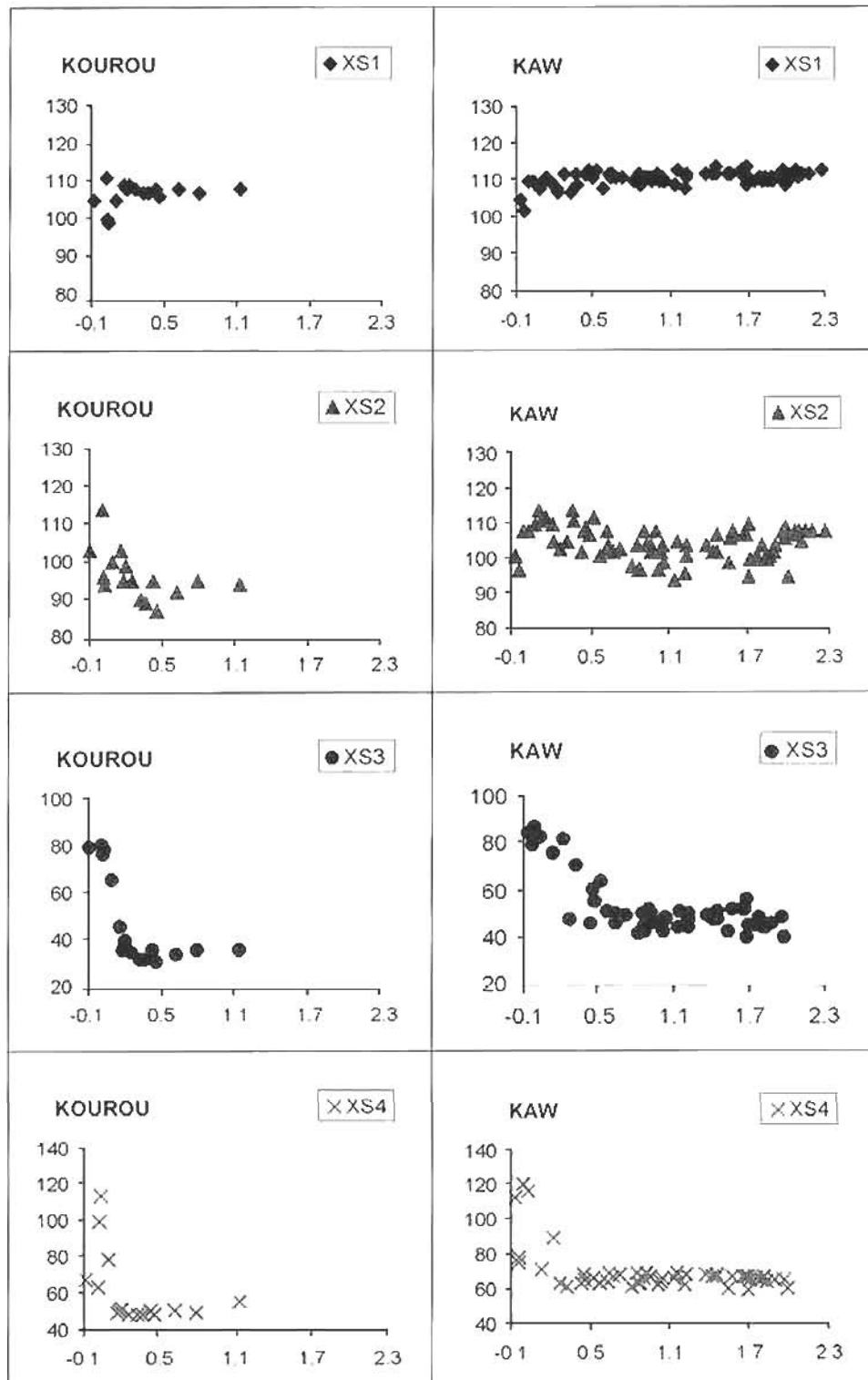


Fig. 17 Relation entre la radiométrie (Compte Numérique) issue de l'image SPOT 5 du 16/03/2003 et la profondeur de l'eau (en abscisse).